



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento
2017

**José Pedro
Figueiredo Lopes
Pereira**

**Avaliação do desempenho da unidade de
TMB da Associação de Municípios da
Região do Planalto Beirão: linha da matéria
orgânica.**



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento

2017

José Pedro

Figueiredo Lopes

Pereira

**Avaliação do desempenho da unidade de
TMB da Associação de Municípios da
Região do Planalto Beirão: linha da
matéria orgânica.**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizado sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

*“Todos querem o perfume das flores,
mas poucos sujam as suas mãos para cultivá-las.”*

Augusto Cury

O júri

Presidente Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogal Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Nelson Augusto Cruz de Azevedo Barros
Professor Associado da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa

Agradecimentos

É uma tarefa difícil para mim descrever num espaço tão pequeno o número de pessoas que me ajudaram a realizar o percurso académico. Cada pessoa ajudou-me à sua maneira, daí que agradeço a todos aqueles que me auxiliaram nesta longa jornada e em particular:

- À professora Ana Paula Gomes pela sua orientação e disponibilidade para me ajudar, mesmo fora de horas;

- À Ferrovia Serviços enquanto empresa, por me ter possibilitado a concretização deste trabalho;

- À Eng.^a Ana Cordeiro, Eng.^a Germana Lobo e ao Técnico Germano Vicente pela sua inteira disponibilidade e paciência ao longo de todo o estágio;

- A todos os engenheiros e colaboradores do Planalto Beirão pela boa disposição diária e por todos os conhecimentos que me transmitiram, ao nível profissional e pessoal;

- À Dr.^a Diana Patoilo e à D. Manuela Marques pela ajuda prestada nos laboratórios.

Quero ainda agradecer a todos os meus colegas e amigos que me apoiaram ao longo deste período e a todos os professores que tive durante a vida, pois os seus ensinamentos ajudaram-me a alcançar este objetivo.

Por fim, o meu maior agradecimento à minha família pela paciência, apoio e por acreditarem no meu esforço. Um especial agradecimento ao meu avô, que embora já não esteja entre nós, os seus conselhos foram especialmente importantes para a minha motivação.

A todos, o meu sincero agradecimento.

Palavras-chave

balanço mássico, compostagem, planalto beirão

Resumo

O presente relatório corresponde ao estágio curricular, que decorreu entre janeiro a julho de 2017, referente ao curso de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, tendo sido realizado na Ferrovia Serviços, uma das empresas instaladas no Planalto Beirão abordando a problemática seguinte:

- A Central de Valorização Orgânica do Planalto Beirão começou a funcionar recentemente na produção de composto, pelo que, tornou-se essencial a sua caracterização através de testes físicos, ensaios químicos e biológicos de forma a avaliar a sua qualidade como corretivo orgânico. Os testes de fitotoxicidade e a análise efetuada à condutividade elétrica apontam para que o produto obtido não apresente níveis significativos de fitotoxicidade pelo que o composto pode ser aplicado no solo sem provocar problemas de fitotoxicidade ou de inibição de atividade biológica. O teste de Dewar e o teste de respirometria, destinados a comprovar a estabilização do composto, apontam para a existência de um composto maturado. De acordo com o Decreto-Lei nº 103/2015, o composto não apresenta valores de pH, sólidos voláteis, humidade ou teores de metais pesados que impossibilitem a sua deposição nos solos. Contudo, de acordo com o mesmo documento, o teor de inertes antropogénicos apresenta-se bastante elevado (cerca de 13%), para que o composto possa ser comercializado, havendo necessidade de um processo de afinação mais rigoroso. Assim, foi possível concluir que, após a retirada de inertes antropogénicos, o composto adquire as características de matéria fertilizante de Classe II para ser adicionado ao solo, em conformidade com o Decreto-Lei nº 103/2015.
- Procedeu-se também a um teste de rendimento à linha do Tratamento Mecânico tendo-se registado que no final do processo de triagem cerca de 53,7% do material de saída é considerado rejeitado, tendo como destino o aterro. Este teste também permitiu concluir que a quantidade de matéria orgânica separada representa 40,07% do material de saída, enquanto o resíduo valorizável representa apenas 6%. Estes resultados encontram-se longe das metas estabelecidas pelo PERSU 2020.
- Relativamente ao balanço mássico à linha de separação de Resíduos Urbanos Biodegradáveis, concluiu-se que ocorre uma maior produção de rejeitados relativamente ao que foi previsto no dimensionamento da Unidade de Tratamento Mecânico (11% relativamente a 8%). Por outro lado a linha recebe menos material proveniente do separador balístico, cerca de 8% menos do que estava previsto. Consequentemente, o caudal que conduz o material para a Central de Valorização Orgânica é menor do que o previsto. Estes resultados levam a concluir que a Unidade de Tratamento Mecânico necessita de otimizar a sua operacionalidade para a garantia dos níveis de eficiência e qualidade do serviço projetados.

Keywords

composting, mass balance, planalto beirão

Abstract

This report corresponds to the curricular internship, which ran from January to July 2017, related to the Integrated Masters in Environmental Engineering, and was carried out at Ferrovial Serviços, one of the companies installed in the Planalto Beirão, addressing the following problems :

- The Organic Evaluation Plant of the Planalto Beirão started to work recently in the production of compounds and, therefore, its characterization through physical and chemical tests became essential to evaluate its quality as an organic correction. Tests of phytotoxicity and analysis of electrical conductivity indicate that the product obtained does not present significant levels of phytotoxicity, so the compound can be applied to the soil without causing problems of phytotoxicity or inhibition of biological activity. The Dewar test, in order to prove the quality of the compound, points to the existence of a matured compound. According to Decree-Law no. 103/2015, of June 17, the compound does not present pH values, volatile solids, moisture content or heavy metals that make deposition impossible on soils. However, the same document points to a rather high anthropogenic inert content (about 13%), so that the compound can be marketed, requiring a more rigorous adjustment process. Thus, it was possible to conclude that after the removal of anthropogenic inerts, the compound acquires the characteristics of Class II fertilizer to be added to the soil, in accordance with Decree-Law no. 103/2015.
- A performance test was also performed on the Mechanical Treatment line and it was recorded that at the end of the screening process about 53.7% of the exit material is considered rejected, being the material at the end sent to the proper landfill. This test also allowed to conclude that the amount of separated organic matter represents 40,07% of the exit material, while the recoverable residue represents only 6%. These results are far from the targets set by PERSU 2020.
- With regard to the mass balance to the line of separation of Biodegradable Urban Waste, it was concluded that there is a higher production of rejects compared to what was foreseen in the design of the Mechanical Treatment Unit (11% compared to 8%). On the other hand, the line receives less material from the ballistic separator, about 8% less than expected. Consequently, the flow rate leading the material to the Organic Recovery Plant is lower than expected. These results lead to the conclusion that the Mechanical Treatment Unit needs to optimize its operability to guarantee the levels of efficiency and quality of service projected.

Índice

| | |
|--|------|
| Índice de Equações..... | II |
| Índice de Tabelas | II |
| Índice de Figuras | IV |
| Nomenclatura..... | VII |
| Acrónimos..... | VIII |
| Capítulo 1. Introdução | 1 |
| Capítulo 2. Associação de Municípios da Região do Planalto Beirão - AMRPB..... | 4 |
| 2.1. Introdução e enquadramento histórico..... | 4 |
| 2.2. Objetivos e metas | 5 |
| 2.3. O sistema de gestão de resíduos da AMRPB..... | 5 |
| 2.4. Infraestruturas do sistema..... | 6 |
| Capítulo 3. Tratamento mecânico de RU | 15 |
| 3.1. Revisão bibliográfica | 15 |
| 3.2. Metodologia de análise | 25 |
| 3.3. Apresentação de resultados | 26 |
| 3.4. Considerações finais..... | 32 |
| Capítulo 4. Caracterização da matéria orgânica segregada na UTM e do composto produzido na CVO..... | 36 |
| 4.1. Descrição do processo de compostagem..... | 36 |
| 4.2. Vantagens e desvantagens do processo de compostagem | 38 |
| 4.3. Método de compostagem..... | 40 |
| 4.4. Fatores relativos às características do substrato | 41 |
| 4.5. Parâmetros de controlo no processo de compostagem | 41 |
| 4.6. Parâmetros de caracterização e avaliação do composto..... | 45 |
| 4.7. Requisitos legais de qualidade do composto | 48 |
| 4.8. Metodologia de análise ao composto e à mistura inicial | 53 |
| 4.9. Apresentação de resultados | 62 |
| 4.9.1. Mistura inicial segregada pela UTM..... | 62 |
| 4.9.2. Evolução do processo de compostagem..... | 69 |
| 4.9.3. Composto | 72 |
| 4.10. Considerações Finais | 76 |
| Capítulo 5. Outras atividades realizadas durante o estágio | 80 |
| Capítulo 6. Discussão global | 82 |

| | |
|--|-----|
| Referências bibliográficas | 83 |
| Anexo A : Esquema da linha de tratamento mecânico de RU do Planalto Beirão | 88 |
| Anexo B: Esquema da unidade de compostagem do Planalto Beirão | 89 |
| Anexo C: Esquema da unidade de afinação do composto do Planalto Beirão | 90 |
| Anexo D: População e produção de resíduos | 91 |
| Anexo E: Balanço Mássico da linha dos RUB (2011)..... | 92 |
| Anexo F: Outras tecnologias de compostagem..... | 93 |
| Anexo G: Compostos comerciais..... | 98 |
| Anexo H: Curvas de calibração para a determinação da concentração dos elementos nos materiais utilizados e compostos obtidos | 99 |
| Anexo I – Intervalos de confiança para a média de uma amostra com distribuição normal | 103 |

Índice de Equações

| | |
|--|----|
| Equação 1 – Percentagem de cada fração do resíduo triado..... | 54 |
| Equação 2 – Teor de matéria seca na amostra (%) | 55 |
| Equação 3 – Teor de humidade na amostra (%)..... | 55 |
| Equação 4 – Teor de sólidos voláteis na amostra (%) | 56 |
| Equação 5 – Teor de cinzas na amostra (%) | 56 |
| Equação 6 - Teor de material inerte antropogénico na amostra (%) | 56 |
| Equação 7 – Teor de pedras na amostra (%) | 56 |
| Equação 8 – Teor de azoto total na amostra (%) | 57 |
| Equação 9 – Índice de germinação (IG)..... | 59 |
| Equação 10 – Índice de crescimento (%)..... | 59 |
| Equação 11 – Taxa de respiração do solo | 60 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Sensores utilizados na triagem automática (Adaptado de Tchobanoglous e Kreith, 2002) | 23 |
| Tabela 2 – Valores estimados para a caracterização da amostra de entrada na linha do TM (Fonte: Ferrovia Serviços, 2016) | 27 |
| Tabela 3 – Rendimento dos raios x na separação das diversas frações do resíduo | 32 |
| Tabela 4 – Sistema de classificação para os CDR, segundo a norma portuguesa NP 4486: 2008 | 34 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5 - Utilização da matéria fertilizante de acordo com a classe. (Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho) | 48 |
| Tabela 6 - Tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas: Grupo 5- Corretivos orgânicos. (Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho) | 49 |
| Tabela 7 - Requisitos aplicáveis às matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, ANEXO II) | 50 |
| Tabela 8 - Valores máximos admissíveis para os teores «totais» de materiais inertes antropogénicos, pedras de granulometria superior a 5 mm na matéria fertilizante com componentes orgânicos RU. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, ANEXO II) | 52 |
| Tabela 9 - Categorias de matéria fertilizante em função do grau de maturação. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ANEXO II) | 52 |
| Tabela 10 - Frações da caracterização e respetivos constituintes. | 54 |
| Tabela 11 - Interpretação dos resultados da produção relativa, em ensaios de vaso..... | 60 |
| Tabela 12 - Grau de maturação do composto de acordo com a temperatura máxima atingida durante o ensaio de auto-aquecimento. (Fonte: Methods Book for the Analysis of Compost, 2003) | 61 |
| Tabela 13 - Valores médios apurados nas análises realizadas para caracterização da MO | 65 |
| Tabela 14 - Valores médios apurados nas análises realizadas para caracterização do composto..... | 74 |
| Tabela 15 - Valores médios apurados nas análises realizadas ao teor de inertes do composto..... | 74 |
| Tabela 16 – Valores médios apurados para o teor de elementos no composto em mg/kg (base seca)..... | 75 |
| Tabela 17 - Índice de crescimento determinado para o composto a partir de 3 réplicas para cada amostra..... | 75 |
| Tabela 18 - Índice de germinação determinado para o composto a partir de 3 réplicas para cada amostra..... | 75 |
| Tabela 19 – Valores das temperaturas máximas - Teste de Dewar | 75 |
| Tabela 20 – Valores médios apurados nas análises realizadas a granulometria do composto..... | 76 |
| Tabela 21 – Valores apurados para o teste respirométrico | 76 |
| Tabela 22 - Valores apurados na análise da condutividade elétrica do composto..... | 76 |
| Tabela 23 - Características físicas e químicas do composto comercial - Siro Agro 2..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 24 - Curva de calibração referente às análises ao sódio (Na) | 99 |
| Tabela 25 - Curva de calibração referente às análises ao potássio (K)..... | 99 |
| Tabela 26- Curva de calibração referente às análises ao manganês (Mn)..... | 100 |
| Tabela 27 – Curva de calibração referente às análises ao ferro (Fe) | 100 |
| Tabela 28 - Curva de calibração referente às análises ao zinco (Zn)..... | 100 |
| Tabela 29 - Curva de calibração referente às análises ao níquel (Ni) | 101 |
| Tabela 30 - Curva de calibração referente às análises ao chumbo (Pb) | 101 |
| Tabela 31 – Curva de calibração referente às análises ao cádmio (Cd) | 101 |
| Tabela 32 - Curva de calibração referente às análises ao crómio (Cr) | 102 |
| Tabela 33 - Curva de calibração referente às análises ao cobre (Cu)..... | 102 |
| Tabela 34 - Valor de c correspondente ao intervalo de confiança pretendido (Kreyszig, 1970) | 103 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Área geográfica abrangida atualmente pelo Planalto Beirão (AMRPB, 2015) ... | 4 |
| Figura.2 - Esquema representativo do CTRSU do Planalto Beirão (AMRPB, 2013) | 6 |
| Figura.3 - Aterro do Planalto Beirão (Foto – José Pereira)..... | 7 |
| Figura 4 - CVE do Planalto Beirão (Foto- José Pereira)..... | 7 |
| Figura.5 - ETAL em funcionamento no Planalto Beirão (Foto – José Pereira) | 8 |
| Figura.6 - ETAR da pista de lavagem presente no Planalto Beirão (Foto- José Pereira) .. | 8 |
| Figura 7 - Prensa usada no centro de triagem seletiva do Planalto Beirão para resíduos de plástico (Foto – José Pereira) | 9 |
| Figura.8 - Unidade de compostagem do Planalto beirão (Foto – José Pereira)..... | 13 |
| Figura 9 - Crivo vibratório: (a) perfil, (b) perspetiva (Adaptado de Tchobanoglous & Kreith, 2002) | 18 |
| Figura 10 - Trommel: (a) possível design, (b) movimento dos resíduos (Adaptado de Tchobanoglous & Kreith, 2002)..... | 19 |
| Figura.11 - Disposição de um posto de triagem manual (Adaptado de Gomes, 2015) | 20 |
| Figura.12 - Exemplo de um separador magnético (Adaptado de Gomes, 2015) | 20 |
| Figura 13 - Separador electromagnético no final de um tapete transportador, 1 – fluxo de resíduos, 2 – materiais ferrosos (Rodrigues, 2009)..... | 21 |
| Figura.14 - Separador por correntes de Foucault (Adaptado de Ribeiro, 2014) | 22 |
| Figura 15 - Separador Balístico (Adaptado de Gomes, 2015) | 22 |
| Figura.16 - Caraterização da amostra de entrada na linha do TM..... | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 – Caraterização da amostra de MO desviada para o piso móvel | 28 |
| Figura 18 – Caraterização da amostra de rejeitado | 29 |
| Figura.19 - Caraterização do rendimento geral da linha do TM..... | 29 |
| Figura 20 – Esquema do balanço mássico efetuado à linha dos RUB | 31 |
| Figura 21 - Representação das diferentes fases que compõem o processo de compostagem (Adaptado de Sá, 2009)..... | 38 |
| Figura 22 - Representação esquemática do sistema de “camas” agitadas (Adaptado de Rynk et al, 1992)..... | 41 |
| Figura.23 - Perfil de distribuição de temperaturas típico de uma pilha de compostagem (Adaptado de Costa, 2014)..... | 43 |
| Figura.24 – Medidores oxitop usados no teste respirométrica (Foto – José Pereira) | 61 |
| Figura 25 – Caraterização física da mistura inicial, com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontínuo – limite inferior)..... | 63 |
| Figura 26 - Caraterização física da mistura inicial com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontínuo – limite inferior)..... | 64 |
| Figura 27 – Teores (%) de Azoto de Kjeldahl, Potássio, Sódio e Manganês (%) com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontínuo – limite inferior) | 67 |
| Figura 28 – Concentração (mg/kg, bs) de metais pesados (Níquel, Ferro, Zinco, Chumbo, Crómio e Cobre) na mistura inicial e no composto com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontínuo – limite inferior)..... | 68 |
| Figura 29 – Evolução da temperatura (laranja) e da humidade (azul) no interior das pilhas de compostagem, na zona de armazenamento (pilhas 40/41, 42, 43, 44, 45 e 46/47)..... | 71 |
| Figura 30 - Evolução da temperatura (laranja) e da humidade (azul) no interior na pilha de compostagem 48, na zona de armazenamento | 72 |
| Figura 31 - Esquema geral do centro de tratamento mecânico de RU do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016) | 88 |
| Figura 32 - Esquema geral da unidade de compostagem do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016) | 89 |
| Figura 33 - Esquema geral da unidade de afinação do composto do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016) | 90 |
| Figura 34 - População residente na região do Planalto Beirão (PORDATA, 2017) | 91 |
| Figura 35 – Produção de resíduos na região abrangida pela AMRPB (EcoBeirão, 2017) 91 | |
| Figura 36 – Esquema do balanço mássico efetuado aquando do dimensionamento do TM em 2011..... | 92 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 - Pilhas revolvidas (Adaptado de Rynk et al, 1992) | 94 |
| Figura 38 - Exemplo de pilhas agregadas (Adaptado de Rynk et al, 1992) | 95 |
| Figura 39 - Representação esquemática de um sistema de silos (Adaptado de Rynk et al, 1992) | 96 |
| Figura 40 - Representação esquemática de um tambor rotativo (Adaptado de Rynk et al, 1992) | 97 |
| Figura 41 - Características físicas e químicas de outros compostos comerciais | 98 |

Nomenclatura

| | | |
|--------------------|---------------------|-----------------------------------|
| °C | Grau Celsius | Unidade de temperatura |
| cm | Centímetro | Unidade de medida |
| dS m ⁻¹ | diSiemens por metro | Unidade de condutividade elétrica |
| g | Grama | Unidade de massa |
| Gg | Gigagrama | Unidade de massa |
| K | Kelvin | Unidade de temperatura |
| kg | Quilograma | Unidade de massa |
| L | Litro | Unidade de volume |
| m | Metro | Unidade de medida |
| m ² | Metro ao quadrado | Unidade de medida |
| m ³ | Metro cúbico | Unidade de medida |
| mm | Milímetro | Unidade de medida |
| MW | Mega-watt | Unidade de potência |
| MWh | Megawatt-hora | Unidade de potência |
| rpm | Rotações por minuto | Unidade de velocidade |
| s | Segundo | Unidade de intervalo de tempo |
| ton | Tonelada | Unidade de massa |
| % | Porcentagem | Unidade percentual |

Acrónimos

AGV – Ácidos gordos voláteis

AMRPB - Associação de municípios da região do planalto beirão

CDR – Combustível derivado de resíduos

CE – Condutividade elétrica

CVE - Central de valorização energética

CVO – Central de valorização orgânica

CT - *Cinta transportadora* (designação em espanhol para tapete transportador)

CTRSU - Centro de tratamento e eliminação de resíduos urbanos

EPA - *Environmental protection agency*

ETAL – Estação de tratamento de águas lixiviantes

ETAR - Estação de tratamento de águas residuais

IC – Índice de crescimento

IG – Índice de germinação

IPCC - Painel intergovernamental sobre alterações climáticas

MO – Matéria orgânica

NIR - Infravermelho próximo

PEAD - Polietileno de alta densidade

PERSU - Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos

PET - Politereftalato de etileno

POSEUR - Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos

PS – Poliestireno

PVC - Policloreto de vinilo

REEE - Resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos

REN - Rede nacional elétrica

RI - resíduos urbanos indiferenciados

RIB – Resíduos industriais banais

RU – Resíduos urbanos

RUB- Resíduos urbanos biodegradáveis

SPV – Sociedade Ponto Verde

TH – Teor de humidade

TM – Tratamento mecânico

TMB – Tratamento mecânico-biológico

UTM – Unidade de tratamento mecânico

Capítulo 1. Introdução

No início da história da humanidade, a natureza coletora e nómada do Homem não causava acumulação significativa de resíduos. Porém, com o aumento da população mundial, a expansão de economias, a rápida urbanização e o aumento do nível de vida da comunidade, a taxa de geração de resíduos urbanos (RU) acelerou significativamente (Minghua et al, 2009). Só em 2015, cada português produzia em média 1,24 kg de resíduos por dia, o que corresponde a uma produção média anual de 452 kg (APA, 2015).

A problemática da acumulação de RU prende-se ao facto destes serem constituídos por componentes orgânicos e inorgânicos que, ao longo do tempo, não sendo inertes, sofrem processos de natureza bioquímica, física e microbiológica. Sendo constituídos essencialmente por matéria orgânica (MO), contêm nutrientes e teores de humidade que associados à temperatura ambiente, favorecem o desenvolvimento de várias espécies de microrganismos (muitos dos quais patogénicos) que serão responsáveis pela decomposição da matéria orgânica, provocando a produção de diversos gases, tais como, o metano, gás cerca de vinte vezes mais nocivo que o CO₂ como gás com efeito de estufa e também potenciador de combustões acidentais, espontâneas ou deliberadas dos RU acondicionados ao ar livre. Estas combustões são acompanhadas pela produção de fumos, gases e vapores tóxicos e/ou corrosivos, constituindo um problema de poluição atmosférica e de saúde pública. É particularmente grave o caso da borracha e do plástico que, contendo cloro e fluor, libertam vapores de ácido clorídrico e ácido fluorídrico (Cruz, 2005).

A simples deposição de RU em espaços abertos sem qualquer processo de tratamento, poderá originar outros problemas tais como a contaminação de solos devido à escorrência de lixiviados, que arrastam consigo elementos patogénicos e tóxicos que põem em causa a qualidade de sistemas aquíferos, acabando por atingir cursos de água e afetar negativamente a vida aquática. O teor de metais pesados nos RU (e.g. mercúrio, cádmio, níquel, crómio) é particularmente importante, pois quando estes se encontram em solução tendem a acumular-se na cadeia alimentar representando uma propagação contínua desses elementos nos seres vivos (Cruz, 2005).

Outro problema decorrente da deposição não controlada de resíduos diz respeito a aspectos de saúde pública, potenciando a ocorrência de doenças (epidérmicas, intestinais, respiratórias), de epidemias (e.g. tifo) ou pandemias (e.g. cólera). A sua transmissão é feita por vetores biológicos (e.g. ratos, moscas, cães, aves, vermes, bactérias, fungos, vírus), que vivem ou são atraídos pelos resíduos. Um exemplo notável é o da Peste Negra, pandemia que afetou cerca de um terço da população europeia no século XIV e causada

pela transmissão de pulgas de ratos que proliferavam nos aglomerados populacionais, devido a inexistência de estruturas sanitárias (esgotos, recolha e tratamento de lixos, etc.), de água tratada e canalizada e à falta de hábitos higiene por parte das populações (Cruz, 2005; Russo, 2003). Perante a importância de tratamento dos RU, a gestão de resíduos afigura-se como sendo uma prioridade para a sociedade, sendo o seu campo de ação extensivo à adoção de sistemas integrados para a redução na fonte, reutilização, reciclagem e a transformação dos resíduos (que inclui a valorização orgânica da fração biodegradável e a incineração) e à sua deposição em aterro.

O presente relatório diz respeito ao estágio curricular realizado na Ferrovial Serviços, empresa que explora a unidade de tratamento mecânico e biológico da Associação de Municípios da Região do Planalto Beirão (AMRPB), entidade gestora dos resíduos urbanos da região do Planalto Beirão, no âmbito de contrato existente entre as duas entidades. O conteúdo do relatório incide sobre a gestão dos resíduos urbanos indiferenciados (RI), mais precisamente no que toca à linha da fração biodegradável dos resíduos urbanos, recepcionados para tratamento mecânico biológico (TMB). Neste contexto, a linha da fração biodegradável dos resíduos urbanos, de agora em diante, será designada de linha da matéria orgânica.

O estágio teve como objectivo geral caracterizar os *inputs* e *outputs* da unidade de valorização orgânica, ou seja, caracterizando a matéria orgânica segregada na unidade de tratamento mecânico (UTM) e o composto produzido pela central de valorização orgânica (CVO).

Como tal, identificaram-se os seguintes objetivos específicos:

- teste de rendimento da UTM;
- balanço mássico à linha da matéria orgânica da UTM;
- estudo físico-químico de:
 - i. da fracção segregada na UTM e destinada à CVO;
 - ii. do composto resultante da CVO.

A concretização destes objectivos é de interesse para a Ferrovial Serviços, na medida em que se evidenciou a necessidade de otimizar o funcionamento do tratamento mecânico de modo a garantir qualidade de matéria orgânica para alimentação da CVO e assim será possível clarificar alguns aspectos relacionados com a sua operação, nomeadamente:

- Quantificar e caracterizar os resíduos processados na UTM, especificamente na linha da matéria orgânica, aferindo se os dispositivos envolvidos na operação de separação

estão em concordância com as especificações da unidade, no sentido da sua otimização;

- Proceder a uma caracterização físico-química do composto obtido na CVO pela técnica de digestão anaeróbia procedida de compostagem, avaliando a conformidade desse produto com o Decreto-Lei nº 103/2015, de 17 de junho, que estabelece as regras a que deve obedecer a colocação no mercado de matérias fertilizantes;

Refere-se que os objectivos inicialmente propostos para o presente estágio, contemplavam a monitorização da etapa de compostagem na CVO. Contudo, decorreram problemas técnicos com alguns órgãos do sistema, que inviabilizaram a obtenção de digestato para estabilização por compostagem, em tempo útil da elaboração do presente relatório.

Uma vez que este relatório abrange operações efectuadas na UTM e na CVO e, no sentido de facilitar a apresentação dos assuntos em causa, optou-se por estruturar em seis capítulos, incluindo a introdução, que se enumeram de seguida:

No Capítulo 2, é caracterizada a instituição proprietária das instalações onde foi desenvolvido o presente trabalho – AMRPB (Associação Municipal da Região do Planalto Beirão).

No Capítulo 3, são abordadas as operações efectuadas na UTM (balanço mássico à linha da matéria orgânica e o teste de rendimento do tratamento mecânico). Este capítulo apresenta a revisão da bibliografia, onde são definidos conceitos fundamentais relativos ao tratamento mecânico usado nas UTM. Aqui também será apresentada a metodologia de análise adotada na elaboração do presente trabalho, sendo também apresentados os resultados obtidos nas análises feitas e a respetiva discussão, bem como as considerações finais.

No Capítulo 4 é exposto o tema de caracterização da matéria orgânica segregada na UTM e do composto produzido na CVO. Este capítulo apresenta a revisão da bibliografia, onde são definidos conceitos fundamentais relativos à estabilização aeróbia, da matéria orgânica digerida na CVO. Aqui também será apresentada a metodologia de análise adotada na elaboração do presente trabalho, sendo também apresentados os resultados obtidos nas análises feitas e a respetiva discussão, bem como as considerações finais.

No Capítulo 5 é feita a exposição de todas as tarefas desenvolvidas ao longo do período de estágio, que não estavam diretamente associadas aos objetivos do trabalho.

Por último, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais onde são tecidas as principais conclusões decorrentes deste estudo bem como algumas sugestões para eventuais trabalhos futuros.

Capítulo 2. Associação de Municípios da Região do Planalto Beirão - AMRPB

2.1. Introdução e enquadramento histórico

Constituída oficialmente a 31 de julho de 1996, a AMRPB foi projetada com o objetivo de criar condições ambientalmente corretas para o destino final dos RU, através de um sistema integrado de recolha, tratamento, valorização e eliminação dos RU produzidos na região, que abrangia 16 municípios. Em 2015, a AMRPB abrangia 19 municípios, servindo uma população de 337 222 habitantes, numa área envolvente de 4461 km². Os municípios abrangidos são Aguiar da Beira, Carregal do Sal, Castro Daire, Gouveia, Mangualde, Mortágua, Nelas, Oliveira de Frades, Oliveira do Hospital, Penalva do Castelo, St^a. Comba Dão, São Pedro do Sul, Sátão, Seia, Tábua, Tondela, Vila Nova de Paiva, Viseu e Vouzela (AMRPB, 2015). A Fig.1 ilustra o território abrangido pela AMRPB

O Plano de Ação do Sistema Intermunicipal da AMRPB – PAPERSU, dá cumprimento ao disposto no Despacho nº 12571/2014, de 14 de outubro, tomando como referência o seguimento das diretrizes apresentadas no Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos, PERSU 2020, aprovado pela Portaria nº187/2014, de 17 de setembro (AMRPB, 2015).

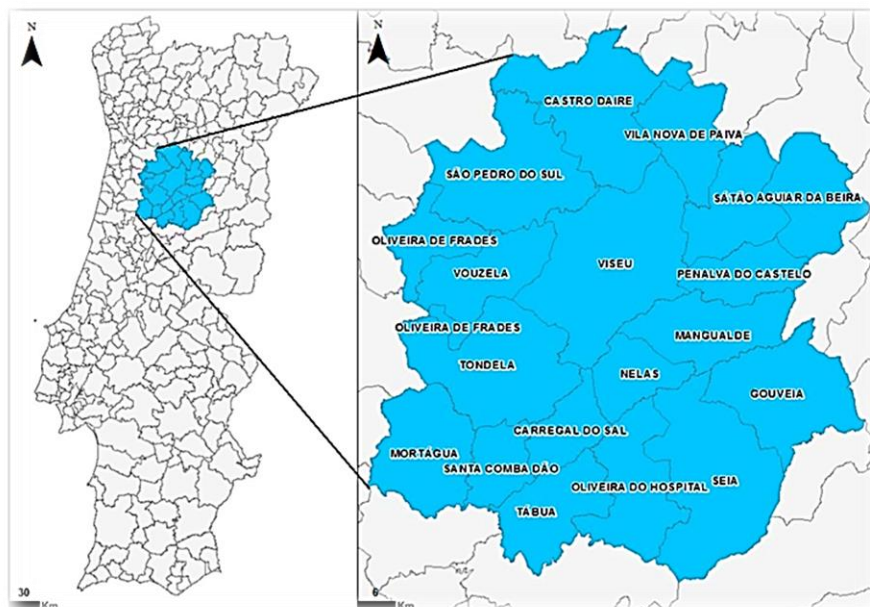


Figura 1 - Área geográfica abrangida atualmente pelo Planalto Beirão (AMRPB, 2015)

2.2. Objetivos e metas

As metas definidas para a AMRPB em cada um dos objetivos propostos no PERSU 2020 (Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos), tendo como base o ano de 2013, são as seguintes (AMRPB, 2015):

- Retomas de recolha seletiva: 20 (kg/hab.ano) → 29 (kg/hab.ano)
- Redução da deposição de RUB em aterro: 93 % → 10 %
- Preparação para reutilização e reciclagem: 13 % → 80 %

Outra meta definida é o escoamento e valorização económica dos materiais resultantes do tratamento de RU. Nesse sentido, as medidas propostas são: melhoria da triagem de resíduos; afinação do composto; escoamento de 9 mil ton por ano de composto resultante do tratamento mecânico e biológico, para aplicação nos solos contribuindo para o aumento da produtividade dos solos nacionais; construção de uma linha de preparação de resíduos para combustíveis derivados de resíduo (CDR) e construção de uma unidade de valorização energética de CDR por gaseificação (AMRPB, 2015).

2.3. O sistema de gestão de resíduos da AMRPB

Os resíduos recolhidos na área de atuação da AMRPB são encaminhados para o centro de tratamento de resíduos sólidos urbanos (CTRSU), localizado na zona da Borralhal, no concelho de Tondela e distrito de Viseu. O CTRSU é constituído por um centro de triagem de recolha seletiva, uma unidade de tratamento mecânico da fração indiferenciada dos RU, uma central de valorização energética (CVE), um aterro, uma estação de águas lixivantes (ETAL), uma CVO, e uma pista de lavagem com a respetiva estação de águas residuais (ETAR). Como infraestruturas de apoio existem ainda os edifícios para escritórios, um auditório, oficinas, báscula de pesagem, portaria, e um posto de abastecimento de combustível (AMRPB, 2015). A constituição do CTRSU encontra-se ilustrada na Fig.2.

Dentro da AMRPB operam 3 empresas: a Ferrovia Serviços, Valorga e a EcoBeirão. A EcoBeirão administra o CTRSU, sendo a Ferrovia Serviços a responsável pela gestão da central de triagem seletiva, aterro, edifício da prensa de resíduos valorizáveis, central de valorização energética e o centro de tratamento mecânico de RU. Os serviços de recolha, transporte a destino final de RU, lavagem, manutenção, fornecimento e colocação de contentores nos municípios do Planalto Beirão, foram adjudicados à Ferrovia Serviços desde 2012. Esta empresa também realiza operações de arranque da CVO, sendo a Valorga a empresa responsável pela coordenação e supervisão de serviços de apoio técnico para esse efeito (AMRPB, 2015).

A complementar o sistema, existem 3 estações de transferência situadas nos municípios de Seia, Viseu e Vouzela. Estas estações têm como função receber os RU dos municípios mais distantes, armazenando-os durante o mínimo de tempo possível para encaminhá-los posteriormente para o CTRSU (AMRPB, 2015).



Figura.2 - Esquema representativo do CTRSU do Planalto Beirão (AMRPB, 2013)

2.4. Infraestruturas do sistema

a) Aterro

Ocupando uma área de 12 hectares, o aterro encontra-se operacional desde 1998 e é constituído por 3 alvéolos, tendo capacidade para receber 1981 Gg de resíduos. Atualmente, os resíduos que aqui são recebidos e eliminados são rejeitados provenientes da UTM do CSTRU, RU resultantes da recolha indiferenciada, resíduos industriais banais (RIB), e rejeitados de recolhas especiais como ecocentros e circuito de monstros. Ao longo da sua área existem diversos poços de biogás e 3 estações de regulação, para onde é conduzido o biogás que será posteriormente encaminhado para a CVE (AMRPB, 2015). A seguinte figura representa o aterro em questão.



Figura.3 - Aterro do Planalto Beirão (Foto – José Pereira)

b) Central de valorização energética

A funcionar desde 2011, a CVE é constituída por 3 motogeradores com capacidade de produção de 3 MW/ano, preparando o biogás que chega do digestor anaeróbio e do aterro para a sua queima, sendo posteriormente convertido em energia elétrica que será vendida à rede elétrica nacional (REN) (AMRPB, 2015). A Fig. 4 ilustra a CVE do Planalto Beirão.



Figura 4 - CVE do Planalto Beirão (Foto- José Pereira)

c) Estação de Tratamento de Águas Lixiviantes

A laborar desde 2000, a ETAL funciona em contínuo, 24 h/dia e 7 dias por semana, recebendo os lixiviados provenientes da unidade de compostagem, aterro, unidade de armazenamento do composto, digestor anaeróbio e os sucos excedentários provenientes da linha de tratamento de sucos originados no digestor anaeróbio. Para proceder ao seu tratamento, a estação dispõe de 2 unidades móveis de Osmose Inversa com capacidade diária para tratar 340 m³ de lixiviado (AMRPB, 2015). A Fig.5 representa a ETAL instalada no Planalto Beirão.



Figura.5 - ETAL em funcionamento no Planalto Beirão (Foto – José Pereira)

d) Pista de lavagem e ETAR

Após a descarga dos resíduos no CTRSU, as viaturas de recolha são lavadas na pista de lavagem, sendo os líquidos resultantes encaminhados para a ETAR (representada na Fig.6). Aqui, serão tratados através de um tratamento físico-químico de flotação com ar dissolvido e coagulação/floculação, seguindo-se de um processo biológico por lamas ativadas (AMRPB, 2015).



Figura.6 - ETAR da pista de lavagem presente no Planalto Beirão (Foto- José Pereira)

e) Centro de triagem seletiva

A funcionar desde 1999, o centro de triagem processa os resíduos recolhidos seletivamente em toda a região do Planalto Beirão, sendo constituído por 2 unidades principais (AMRPB, 2015):

- Triagem de resíduos de embalagens de plástico/metal, com uma área de 2400 m² e uma capacidade instalada de 3000 ton/ano. Para além de receber os resíduos recolhidos seletivamente na região, a unidade também recebe a fração de

polímeros provenientes do TM de resíduos indiferenciados. A unidade é equipada por 2 prensas, sendo uma para plástico e outra para metal ferroso e não ferroso. Na Fig.7 é possível ver a prensa usada para resíduos de plástico.

- Triagem de resíduos de papel/cartão, com uma área de 1000 m² e uma capacidade instalada de 3500 ton/ano. Processa toda a fração de recolha seletiva de papel/cartão.

Para além dos resíduos de papel/cartão e plástico/metal, o centro também recebe resíduos de vidro, resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE), madeira, e pilhas e acumuladores. Os resíduos processados no centro são enviados para valorização através da Sociedade Ponto Verde (SPV) e outros retomadores acreditados.



Figura 7 - Prensa usada no centro de triagem seletiva do Planalto Beirão para resíduos de plástico (Foto – José Pereira)

f) Lixeiras

Atualmente, as 19 antigas lixeiras que se encontravam em funcionamento na região, encontram-se seladas (processo efetuado entre dezembro de 1998 e janeiro de 2002) e recuperadas do ponto de vista ambiental e paisagístico, recebendo a atenção da AMRPB em termos de vigilância e monitorização do seu comportamento. As lixeiras encontram-se nos municípios de Carregal do Sal, Gouveia, Mangualde, Mortágua, Oliveira do Hospital, Oliveira de Frades, Penalva do Castelo, Santa Comba Dão, São Pedro do Sul, Satão, Seia, Tábua, Tondela, Vila Nova de Paiva e Vouzela. Os RU de Aguiar da Beira foram transferidos para Vila Nova de Paiva, município que também recebe os RU de Castro de Daire (AMRPB, 2015).

g) Unidade de tratamento mecânico

Na UTM promove-se a separação mecânica dos resíduos indiferenciados em matéria orgânica, materiais recicláveis e rejeitados. No caso da matéria orgânica, esta é encaminhada para a CVO para a produção de composto e biogás, enquanto os materiais recicláveis e os rejeitados são enviados, respetivamente, para reciclagem e para aterro. A unidade do Planalto Beirão tem capacidade de separar 130 Gg de resíduos biodegradáveis por ano (AMRPB, 2015). O processo de TM do Planalto Beirão encontra-se demonstrado no Anexo A.

Antes de se iniciar o tratamento, as viaturas de recolha de resíduos são pesadas na báscula. Após a pesagem, estas deslocam-se para a UTM, onde descarregam os resíduos na zona de receção. Estes serão transferidos por uma pá carregadora para um alimentador (tremonha de descarga) que cai sobre um tapete transportador que os levará para o *trommel* 1. Neste equipamento é promovida uma primeira seleção dos resíduos, separando-os segundo as suas dimensões: os maiores e menores que 60 mm. Os resíduos com dimensões menores que 60 mm passam pelas perfurações do cilindro, caindo para um tapete transportador que fará com que passem por um separador eletromagnético. Mais à frente, os resíduos caem sobre o crivo, onde é feita a separação granulométrica em três frações diferentes: material mais fino (que será considerado material rejeitado), resíduos com dimensões entre 30 a 60 mm, e resíduos com dimensões entre 8 a 30 mm. Os dois últimos seguirão para mecanismos separadores por raio X. Apartir daqui, os materiais rejeitados são encaminhados para aterro, enquanto a parte selecionada sem impurezas continua pelos tapetes transportadores, tendo como destino a CVO.

Relativamente ao material que sai pela parte da frente do *trommel* 1 (fração > 60 mm), este será conduzido para o *trommel* 2. Aqui serão levadas a cabo três seleções:

- Material menor que 150 mm, que irá passar por um separador magnético. As peças ferromagnéticas extraídas serão encaminhadas para a prensa de materiais ferrosos. O material não ferroso seguirá para o separador balístico;
- Material entre 150 a 300 mm, que seguirá para uma cabine de seleção/triagem onde será efetuada manualmente a triagem positiva dos resíduos (remoção do tapete dos materiais valorizáveis, deixando ficar os indesejáveis), de onde serão retirados o cartão/papel-embalagem, cartão complexo (tetrapack), papel de arquivo e rejeitados. O papel de jornal e as revistas seguem por triagem negativa. Os materiais mais volumosos, como o caso dos sacos que contêm resíduos, seguem

em frente para o *terminator* (abre-sacos). A partir daqui seguem para o separador balístico;

- Material maior que 300 mm, que passará por um processo de triagem manual de onde serão retirados da linha os filmes plástico 1 e os monstros. Os rejeitados seguirão para aterro ou para sistemas de valorização de resíduos alternativos.

Relativamente ao separador balístico, aqui procede-se à separação dos resíduos por três vias:

- O material mais fino, que passa pelas perfurações das barras do separador. Este material será levado a passar por um separador electromagnético, seguindo a partir daí para o crivo;
- Os Rolantes que, pelo seu volume, rolam no sentido descendente do separador balístico. Serão levados a passar por um separador magnético para extrair peças ferromagnéticas que se encontram no material, tendo como destino a prensa de materiais ferrosos. O resto do material irá passar por um separador ótico. O material retirado por este mecanismo cai para um transportador inferior ou um contentor. Os rejeitados irão seguir para aterro;
- Os Planos que, por serem mais leves e flexíveis, são empurrados no sentido ascendente do balístico. Através do atrito provocado pelo contacto com as barras em movimento, são encaminhados para um separador ótico. Os rejeitados serão encaminhados para aterro, enquanto o material retirado pelo separador ótico cairá para um transportador inferior ou um contentor.

h) Central de valorização orgânica

A CVO do Planalto Beirão está dimensionada para receber e tratar 30 Gg de resíduo urbano biodegradável (RUB) por ano. O processo de valorização orgânica começa com a fase da digestão anaeróbia/metanização. Os RUB triados são descarregados na tremonha, mecanismo de receção que receberá não só resíduos, como também: vapor produzido na caldeira através da queima de uma parte do biogás proveniente do digestor; fermento (também produzido no digestor anaeróbio); uma pequena parte de sucos prensados; uma parte de sucos filtrados. Todo isto será descarregado no malaxador que irá misturar tudo o que recebe. Daqui, a mistura segue para o interior do digestor anaeróbio, com um teor médio de humidade de 56,1%. É importante referir que este digestor funciona por via seca.

O digestor usado no Planalto Beirão é um reservatório cilíndrico vertical em betão armado com uma capacidade útil de 3486 m³, diâmetro interior de 15 m e uma altura útil de 20,6 m. Este digestor funciona na gama de temperaturas mesófilas. Para favorecer as condições térmicas nas quais as bactérias devem operar, o digestor é isolado termicamente do meio externo por uma cobertura metálica e lã de vidro. O contributo de energia térmica que garante esta função é assumido por injeção de vapor pressurizada ao nível do equipamento de introdução no digestor. A produção de vapor é assegurada por uma caldeira que consome uma parte do biogás produzido. Em caso de necessidade, a caldeira pode utilizar como combustível, gasóleo armazenado em permanência na proximidade. Para além da temperatura, outro aspeto primordial do procedimento é a agitação da matéria contida no seu interior. Será feita através de injeção em ciclo fechado de uma parte do biogás produzido. Esta injeção executa-se sob pressão através da laje de fundo graças aos injetores. A agitação também permite: a homogeneização da matéria a nível térmico e qualitativo em relação às flutuações de granulometria e de composição dos produtos introduzidos; a aceleração da condução do biogás produzido para a parte superior do digestor pela qual é extraído; impedir a aglomeração da matéria contida no digestor; aumentar a circulação da matéria no seio do digestor; manter as partículas mais leves (que tendem a flutuar) e as pesadas (que tendem a decantar) no seio da matéria. O tempo de retenção da massa no digestor é em média 25 dias. Ao fim desse tempo, a extração da matéria do digestor é feita de forma gravítica pelas picagens de extração situadas na parte inferior do digestor. Os produtos da digestão serão biogás, fermento e digerido humificado. Este último seguirá para a prensa. Do processo de prensagem irão ser gerados um subproduto sólido (cujo teor em matéria seca é de 43 a 51 %) que irá cair no parafuso de alimentação, e um subproduto líquido (com um teor em matéria seca de 13 a 14%) que será armazenado num tanque para sumo bruto, sendo uma pequena parte enviada para a tremonha. Os efluentes armazenados serão bombeados para o misturado dinâmico, onde se levará a cabo a mistura dos sucos com um composto flocculante (polielectrólito) proveniente da unidade de flocculação. Os sucos flocculados são então despejados no filtro de bandas que irá reforçar o processo de separação de líquidos/sólidos. O líquido clarificado daí resultante será enviado para um recipiente de armazenagem enterrado, sendo que uma fração considerável irá ser enviada para a tremonha. Também há que considerar a produção de uma fração de líquidos considerados excedentários, que será conduzida para a ETAL. Relativamente à matéria desidratada proveniente do filtro de bandas, esta irá juntar-se à matéria sólida proveniente da prensa no parafuso de

alimentação, seguindo para compostagem. O processo de compostagem do Planalto Beirão encontra-se demonstrado no Anexo B.

O método de compostagem usado no Planalto Beirão é o Sistema Reator Horizontal (*Horizontal In-Vessel System*). A unidade contém 5 corredores de armazenagem com 32 m de comprimento, largura de 4,5 m, um poder de retenção de 2,2 m de produto e com um fundo composto por duas linhas goteiras com ventilação (ver Fig. 8). Tal como foi referido anteriormente, a unidade de compostagem recebe a matéria desidratada proveniente do parafuso de alimentação, sendo encaminhada para um transportador de tela, situado numa ponte distribuidora. Apartir daqui é feito o fornecimento com a mistura do agente estruturante (restos de resíduos verdes) proveniente da zona de afinação, com a matéria desidratada. Esta mistura irá ser repartida por cada túnel.

Ao fim de cerca de 2 semanas de estadia nos corredores, a matéria encontra-se estabilizada e libertada de uma parte da sua humidade inicial. Enquanto os lixiviados são recolhidos através da laje perfurada e enviados para uma cuba de armazenagem, o composto será evacuado por um transportador de tela que se encontra no final dos túneis para o descompactador que permite desagregar o composto que ainda possa vir aglomerado da fase de maturação. Daqui o composto é transportado por via de um transportador de tela para um *trommel*. Através da utilização de uma malha de 20 mm, este dispositivo irá permitir separar o material refinado dos refugos de afinação. O material refinado será conduzido por uma pá carregadora para a zona de armazenagem, uma área de 960 m² e com uma capacidade de armazenagem de 2800 m³, encontrando-se situada no exterior do edifício principal e composta por 5 células. Os refugos de afinação são enviados para aterro ou, são utilizados como elemento estruturante no processo de compostagem. O processo de afinação do composto utilizado no Planalto Beirão encontra-se ilustrado no Anexo C.



Figura.8 - Unidade de compostagem do Planalto beirão (Foto – José Pereira)

i) Circuito de ventilação

No interior dos edifícios da CVO e da UTM são originados odores que poderão ter várias fontes: armazenamento dos RU no edifício de recepção; lamas resultantes da metanização que ao serem despressurizadas nos diferentes aparelhos de tratamento libertam gases; fermentação aeróbia durante a compostagem; unidade de afinação de composto. Em cada uma destas unidades existe um conjunto de circuitos de ventilação que irão captar odores, conduzindo-os para tratamento.

Nos edifícios de recepção, tratamento mecânico e afinação, o ar é captado por intermédio de bainhas e de bocas de aspiração, sendo enviado para o biofiltro. Os gases originados na CVO são captados por uma rede de bainhas aéreas ou por uma rede de goteiras situadas sob os corredores onde se efetua a compostagem. Estes gases serão tratados por via de um lavador ácido e depois por um biofiltro. A função do lavador ácido é promover o abatimento do amoníaco contido no ar a tratar, por neutralização química ácido-base. O ar que sai do lavador ácido e o resultante das unidades de recepção, tratamento mecânico e afinação, passa depois no biofiltro, sendo este constituído por um recinto rectangular em betão armado, cujo fundo bem como as paredes verticais são revestidas por uma pintura antiácida. Esta unidade alberga cerca de 714 m³ de material filtrador (estilha). O biofiltro terá como função o abatimento de H₂S, dos mercaptanos e das aminas que se encontram no ar a tratar.

Capítulo 3. Tratamento mecânico de RU

Segundo o Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho, a triagem é *“o acto de separação de resíduos mediante processos manuais ou mecânicos, sem alteração das suas características, com vista ao seu tratamento”*. Assim, uma estação de triagem é uma unidade industrial cuja matéria-prima são os resíduos e o produto final são os seus materiais constituintes, agrupados de forma homogênea e devidamente acondicionados, de acordo com as especificações técnicas das indústrias recicladoras (Rodrigues, 2009).

O TM é um processo de separação física dos resíduos indiferenciados, tendo como principal objetivo separar a fração orgânica dos restantes resíduos que são considerados contaminantes tais como o vidro, o plástico, o papel, o cartão, os têxteis e os resíduos volumosos. O uso do tratamento mecânico para separar RU tem várias vantagens (Rojas, 2014) designadamente:

- A redução do volume de resíduos que vai para aterro ou para a incineração;
- O envio de menos RUB para o aterro, implica a redução da produção de lixiviados e de biogás. Sendo o biogás uma mistura de gases onde se destaca a presença de CH₄ e de CO₂, traz implicações ambientais a nível global, contribuindo significativamente para o efeito de estufa, uma vez que o metano é responsável, por 19% do aquecimento antropogénico, tal como considera o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) (Russo, 2003);
- O fracionamento de partículas e a homogeneização dos resíduos para otimizar sua biodegradabilidade durante os processos biológicos de pré-tratamento;
- A optimização das operações de valorização orgânica de resíduos, permitindo a separação de RUB de contaminantes antropogénicos, aumentando a produção de biogás no digestor anaeróbio (com respetiva valorização energética na CVE), e aumentar a qualidade/estabilização do produto final da fração orgânica de RU, após tratamento(s) biológico(s), i.e. digestão anaeróbia e/ou compostagem;
- Na recuperação de frações recicláveis e valorizáveis dos RU.

O uso de TM para separar RUB de inertes antropogénicos vai de encontro ao que foi estipulado pelo Art.º 8.º do Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, que estabelece para a redução dos RUB, destinados a aterro, o seguinte: *“até julho de 2020 os resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro devem ser reduzidos para 35 % da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995”*. Posteriormente, o PERSU 2020 veio revogar as metas previstas no D.L. nº 183/2009,

estabelecendo o seguinte: *“Eliminação progressiva da deposição de resíduos em aterro, com vista à erradicação da deposição direta de RU em aterro até 2030”* (APA, 2014).

3.1. Operações Unitárias no tratamento mecânico de RU

A caracterização das operações unitárias existentes na UTM de RU compreende cinco fases diferentes (Gomes, 2015): redução de tamanho; pré-triagem; triagem; compactação e manuseamento.

3.1.1. Redução de tamanho

Frequentemente trata-se da primeira etapa do tratamento mecânico (TM), tendo como finalidade: a redução dos resíduos mais volumosos a dimensões mais pequenas; a promoção da homogeneização da mistura de resíduos; o controlo da descarga de resíduos para equipamentos a jusante; e a fragmentação dos resíduos que se encontram agregados. Alguns destes equipamentos são:

a) Moinhos de martelos

Este mecanismo é constituído por martelos montados num eixo horizontal ou vertical, (sendo o primeiro o mais utilizado) no interior de uma câmara. Os moinhos de martelos de eixo horizontal caracterizam-se por possuírem um crivo com aberturas com o tamanho que o utilizador desejar. Os resíduos são triturados pelos martelos e ficam no interior da câmara cilíndrica até possuírem tamanho que permita passar pelas aberturas. Nos equipamentos com eixo vertical, a câmara é em forma de cone e não existe crivo de fundo pelo que deve ser mantida uma distância constante entre o último martelo e o fundo da câmara. Aqui será o número de martelos que determinará o tamanho dos resíduos. Os resíduos são movidos para o fundo do cone pelo movimento dos martelos complementado com a força da gravidade (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

b) Triturador por lâminas de corte

Este mecanismo é equipado com um ou dois eixos horizontais de movimento contrário, que contém lâminas que cortam e rasgam os resíduos. O material introduzido no triturador irá passar através dos espaços formados entre as lâminas que contém pequenas saliências para agarrar o material (Gomes, 2015).

c) Moinho de malhos

Semelhante ao moinho de martelos, embora contenha malhos com espessura fina em vez de martelos, espaçados uns dos outros e montados no eixo rotativo. Os resíduos são

introduzidos pela parte superior do equipamento e passam uma única vez pela área do eixo, uma vez que não existe um crivo no fundo (Gomes, 2015).

d) Moinho de bolas

O moinho de bolas é constituído por um tambor rotativo com bolas pesadas no seu interior, que adquirem movimento em cascata devido à rotação do tambor, entrando em contacto com os resíduos, promovendo a redução do seu tamanho (Gomes, 2015).

3.1.2. Pré-Triagem

Nesta fase organiza-se o fluxo de resíduos de maneira a simplificar e melhorar o processo de triagem propriamente dito, removendo os materiais contaminantes de grandes dimensões (e.g. grades plásticas, mobiliário de jardim ou vasouras), evitando assim danos mecânicos nos equipamentos a jusante. Devem também ser removidos os materiais de dimensão reduzida, designados por finos, pois o seu tamanho demasiado reduzido para além de dificultar a triagem não permite a sua reciclagem (Rodrigues, 2009). Alguns destes equipamentos são:

a) Abre sacos

Por norma, a fracção orgânica que chega às UTM provém da recolha selectiva ou indiferenciada e vem fechada em sacos plásticos. Para os romper e libertar o seu conteúdo, utiliza-se máquinas abre-sacos que contêm um rotor com lâminas incorporadas em forma de espiral, e um conjunto de lâminas fixas, cuja abertura de corte pode ser regulada. Esta regulação será importante para controlar o estado e fluxo de material que sai (Teixeira, 2009). O desempenho destas máquinas poderá ser afetado por objetos volumosos ou por problemas associados a sacos de plásticos de diferentes tamanhos. Para minimizar ou evitar possíveis problemas, preservando a sua eficiência, é aconselhável a limpeza diária das lâminas fixas (Piedade & Aguiar, 2010). Uma vez que a função destas máquinas é romper e não triturar, o esforço que lhes é induzido é pouco significativo, sendo os seus componentes pouco afectados pelo desgaste e apresentando períodos de utilização bastante prolongados (Rojas, 2014).

b) Aspirador de Filme

Implantado após o abre sacos, este equipamento é constituído por uma conduta onde os filmes e os sacos de plástico são aspirados para uma zona ou contentor de deposição, através de uma corrente de ar em sucção. Trata-se de um mecanismo vital para uma

estação de tratamento de resíduos pois os filmes e os sacos de plástico são materiais leves e flexíveis, podendo facilmente introduzir-se no interior dos equipamentos, causando-lhes avarias ou diminuição de eficiência (Rodrigues, 2009).

c) Crivo vibratório

O crivo vibratório consiste num mecanismo constituído por uma ou mais placas perfuradas que possuem movimento vibratório, colocadas sob um plano inclinado. A Fig.9 representa um crivo vibratório com duas placas, para separar três frações diferentes. Como se pode verificar na figura, os resíduos são introduzidos na parte inicial do crivo e vão-se movimentando até ao final do mesmo, devido ao declive que a/s placa/s apresenta/m. O movimento vibratório também obriga os resíduos a moverem-se, porque lhes confere um movimento oscilatório vertical. Este movimento provoca não só colisões entre os resíduos e a placa, como também a passagem dos resíduos de menores dimensões pelas perfurações da/s placa/s (Tchobanoglous & Kreith, 2002). A passagem dos RU por este mecanismo é importante, nomeadamente para a triagem de pequenos fragmentos de vidro que a jusante podem encravar os equipamentos, contaminar os restantes resíduos, e provocar acidentes na triagem manual. Por outro lado, este mecanismo pode apresentar problemas se receber resíduos húmidos, pegajosos e/ou filmes plásticos que podem aderir aos orifícios diminuindo a sua secção ou enrolar-se nas barras, encravando-as. Superfícies grandes, como placas de cartão, podem obstruir as saídas e diminuir a eficiência do equipamento (Rodrigues, 2009).

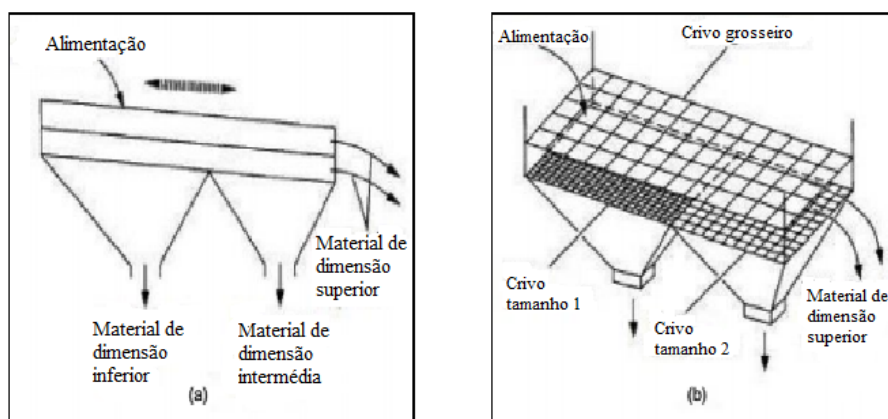


Figura 9 - Crivo vibratório: (a) perfil, (b) perspectiva (Adaptado de Tchobanoglous & Kreith, 2002)

d) Trommel ou crivo rotativo

O *trommel* é constituído por um cilindro perfurado com movimento rotativo, que se encontra posicionado a um pequeno ângulo em relação à horizontal. No seu interior, possui suportes

que permitem um melhor movimento de levantamento e queda dos resíduos. Para além destes suportes, o mecanismo pode ainda ser munido de lâminas na extremidade inicial e/ou ao longo do seu interior, com o objetivo de abrir sacos (Gomes, 2015). A mistura de resíduos em separação entra pela extremidade superior do cilindro, e desce ao longo do mesmo em espiral, devido à inclinação e à rotação do *trommel*, sendo triados os resíduos de menores dimensões através das perfurações do cilindro. Os resíduos de maior fração prosseguem para a extremidade final do crivo (Rodrigues, 2009). Na Fig. 10 é possível ver um exemplar de um *trommel*.

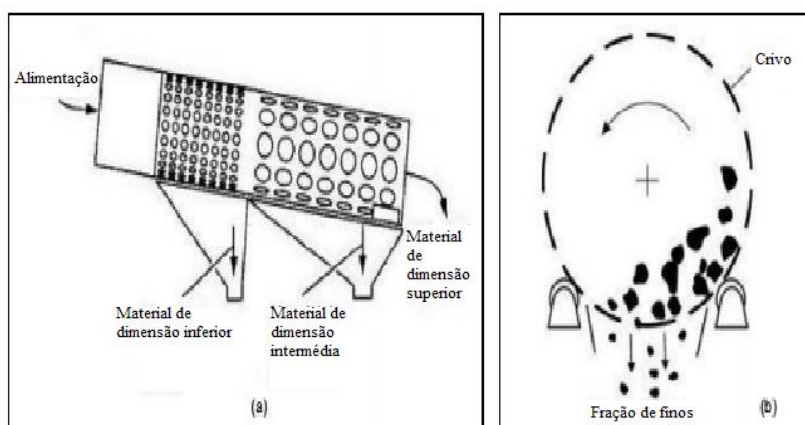


Figura 10 - Trommel: (a) possível design, (b) movimento dos resíduos (Adaptado de Tchobanoglous & Kreith, 2002)

e) Classificadores por ar

O funcionamento deste mecanismo baseia-se na diferença de densidade dos materiais submetidos a um fluxo de ar, permitindo a separação dos materiais leves (papel e plástico) dos materiais pesados (metais ferrosos e vidro). Uma classificação por fluxo de ar inclui o uso de um ciclone para separar os materiais sólidos do ar e promover também a fixação de partículas de modo a evitar que estas se dispersem. Este procedimento implica operações frequentes de limpeza para eliminar obstruções, situação que pode ser assegurada com ar comprimido em contra-corrente para descolmatagem dos filtros (Piedade & Aguiar, 2010). A utilização deste equipamento pode ser útil na limpeza da fracção ferrosa, após a triagem, para remoção de papel e plásticos residuais que tenham vindo agarrados (Díaz et al., 1993).

3.1.3. Triagem

Nesta fase procede-se à separação de conjuntos de materiais com as mesmas características, de acordo com as especificações técnicas das indústrias retomadoras, e com a menor quantidade possível de impurezas. Destacam-se os seguintes equipamentos:

a) Mesas de triagem manual

A triagem manual é realizada em mesas de triagem (ver Fig. 11), equipamentos que apresentam os materiais diante dos postos de triagem manual. As cabines onde ocorre a triagem manual encontram-se situadas numa plataforma sobre silos ou contentores, onde os trabalhadores depositam os materiais triados (Piedade & Aguiar, 2010). A triagem pode ser positiva (quando se retiram os materiais recicláveis) ou negativa (quando se removem os materiais não desejáveis das mesas) (Gomes, 2015).

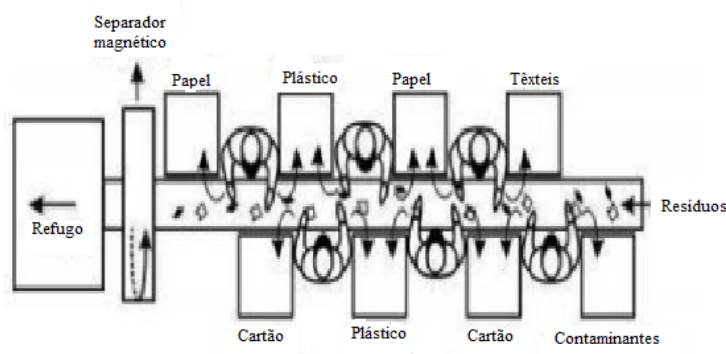


Figura.11 - Disposição de um posto de triagem manual (Adaptado de Gomes, 2015)

b) Separador Magnético

Mecanismo utilizado para a recuperação de metais ferrosos do fluxo dos resíduos, tirando partido das suas propriedades magnéticas. São várias as suas configurações: em forma de tambor; correia ou tela magnética; e roldana de cabeça magnética. Um factor importante para o seu funcionamento é a selecção da força do campo magnético a aplicar de forma a sobrepor-se à altura e peso dos resíduos, e retirar os metais ferrosos do fluxo. A força magnética necessária depende do peso do material e da distância deste ao magneto (Piedade & Aguiar, 2010; Tchobanoglous & Kreith, 2002). Na Fig. 12 é possível observar um exemplo de separador magnético.

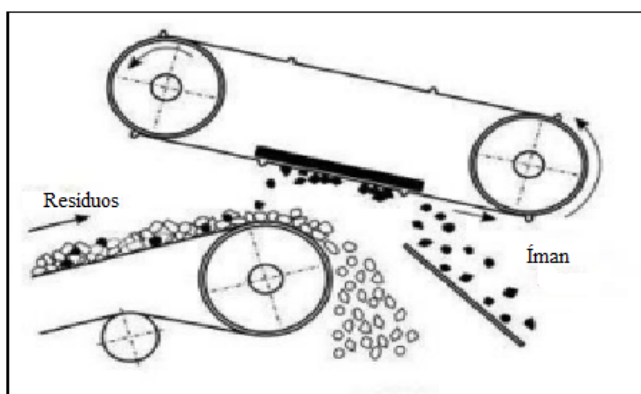


Figura.12 - Exemplo de um separador magnético (Adaptado de Gomes, 2015)

c) Separador Electromagnético

O separador eletromagnético (ver Fig. 13) é constituído por um potente eletroímã, que forma por sua vez a estrutura principal, ou corpo suporte, de uma pequena cinta nervurada que envolve o eletroímã. As peças ferromagnéticas que se encontrem a circular no tapete transportador, ao entrar dentro do campo magnético gerado pelo eletroímã, são atraídas e ascendem até à pequena cinta que rodeia o eletroímã. As nervuras desta cinta arrastam a peça atraída até a retirar do campo magnético, soltando-se livremente.

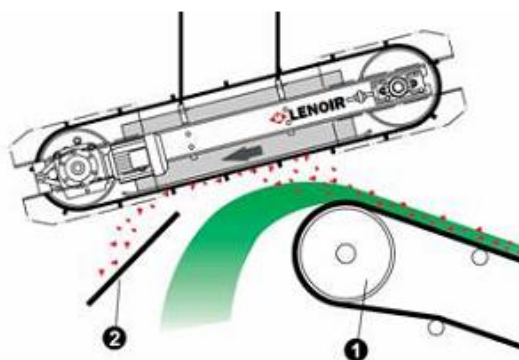


Figura 13 - Separador electromagnético no final de um tapete transportador, 1 – fluxo de resíduos, 2 – materiais ferrosos (Rodrigues, 2009)

d) Separador por correntes de Foucault

O princípio das correntes de Foucault é a geração de campos magnéticos repulsivos para o alumínio e os metais não ferrosos, o que permite separá-los duma mistura de embalagens. Os metais não ferrosos são removidos do restante material, através de correntes elétricas induzidas, capazes de produzirem campos magnéticos contrários aos dos metais não ferrosos. Estas correntes elétricas induzidas (correntes de Foucault), exercem uma força sobre os metais não ferrosos, de modo que os coloca fora do campo magnético, promovendo assim, a separação desejada (Ribeiro, 2014). Um exemplar deste mecanismo encontra-se representado na Fig. 14.

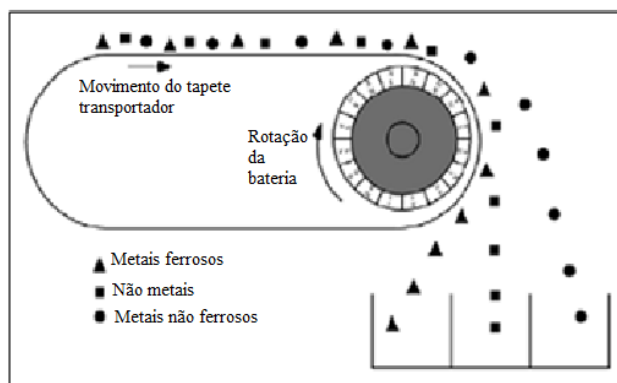


Figura.14 - Separador por correntes de Foucault (Adaptado de Ribeiro, 2014)

e) Separador Balístico

Este mecanismo permite a separação dos resíduos em três frações diferentes: rolantes; planos; finos (ver Fig. 15). É constituído por um conjunto de placas longitudinais perfuradas, com inclinação variável (tipicamente entre 15% a 20%) e movimento vibratório permanente e alternado, no sentido vertical e horizontal (Gomes, 2015). Os resíduos planos, como o filme plástico ou o papel, “aderem” às lâminas e são transportados, em sentido ascendente até ao cimo do equipamento, onde são recolhidos. Os resíduos rolantes, como garrafas de bebidas ou embalagens de detergente, pela sua elasticidade e pelo movimento das lâminas, deslocam-se no sentido descendente do equipamento, caindo num transportador diferente. Relativamente aos resíduos finos, estes passam pelos orifícios das lâminas, sendo recolhidos num transportador próprio para o efeito (Rodrigues, 2009).

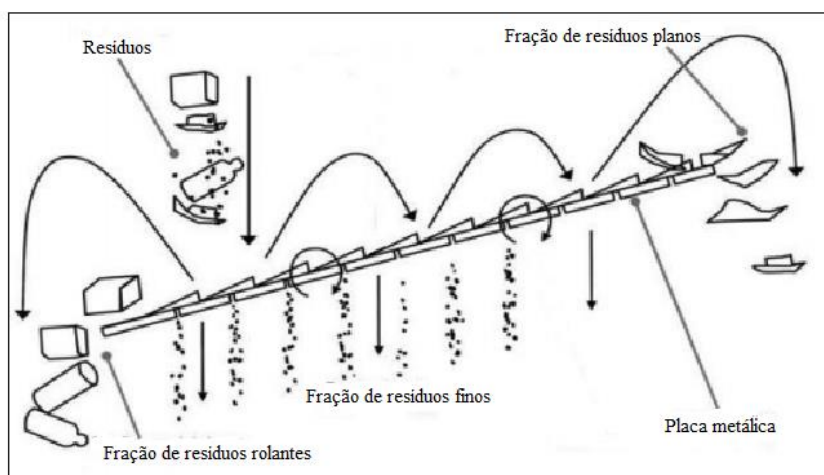


Figura 15 - Separador Balístico (Adaptado de Gomes, 2015)

f) Triagem automática com sensores

Este tipo de triagem é realizado através do auxílio de sensores de diversos tipos, de modo a separar por via automática os materiais nos fluxos respetivos, com as características

desejadas. Várias são as tipologias de sensores usadas. Uma delas é o separador ótico. Trata-se de uma técnica usada para identificar e separar os resíduos por diferentes categorias (Piedade & Aguiar, 2010). O mecanismo é constituído por quatro componentes: sistema de alimentação; sistema de identificação (sensores); microprocessador para classificar os resíduos e enviar informação ao sistema de injeção; e um sistema de injeção de ar comprimido que assegura a separação da fração desejada para fora do fluxo, encaminhando-o para o respetivo coletor (Gomes, 2015). Este tipo de sensor é indicada para a separação de embalagens plásticas e não plásticas. A separação é feita a partir da tipologia do material como Politereftalato de Etileno (PET), Polietileno de alta densidade (PEAD), Policloreto de vinilo (PVC), Poliestireno (PS), etc., Outro separador é o mecanismo de raio X. A sua função é identificar e separar materiais com base na sua densidade atómica, sendo aplicados para separar a matéria orgânica da matéria não orgânica, assegurando que sejam removidos materiais impróprios à digestão anaeróbia (Piedade & Aguiar, 2010). Na Tabela 1 encontram-se tipos de sensores disponíveis no mercado.

Tabela 1 - Sensores utilizados na triagem automática (Adaptado de Tchobanoglous e Kreith, 2002)

| Tipo de sensor | Utilização |
|------------------------------------|---|
| Reconhecimento de imagem | Digitalização do objecto e comparação com uma base de dados |
| Fluorescência de raios-x | Detecção de átomos de cloro em PVC |
| Transmissão de raios-x | |
| Infravermelho | Distinção entre materiais transparentes, translúcidos e opacos |
| NIR (Infravermelho próximo) | Distinção das resinas constituintes dos plásticos |
| Electrostático | Separação de diferentes materiais não conductores, como o plástico do papel, pela sua permitividade eléctrica |

3.1.4. Compactação

O objectivo desta fase é diminuir o volume dos materiais, recorrendo à compactação dos materiais obtidos. Deste modo, é possível manusear os resíduos triados de forma mais facilitada, otimizando também o espaço de armazenamento e a capacidade disponível

dos veículos das indústrias retomadoras, com a consequente redução de custos associada (Rodrigues, 2009). Destacam-se os seguintes equipamentos:

a) Prensas enfardadoras

As prensas enfardadoras são equipamentos de resistência sólida uma vez que utilizam as paredes das câmaras de prensagem como uma resistência sólida (Piedade & Aguiar, 2010). A alimentação da prensa pode ser manual, mas normalmente o fluxo dos materiais é introduzido numa zona superior da prensa por meio dum transportador. Na versão mais comum, a compactação é conseguida por meio da pressão exercida pelos impulsos sucessivos de um êmbolo. Os fardos, uma vez prontos, são amarrados, com arame ou fio plástico. O fardo seguinte serve de êmbolo ao fardo anterior, empurrando-o para fora da prensa (Rodrigues, 2009).

b) Pelletizadoras

Trata-se de equipamentos de moldagem por extrusão, pois utilizam um molde para conferir resistência. Com os materiais triados, estes mecanismos produzem *pellets* cilíndricos por acondicionamento, compressão-moldação e arrefecimento (Gomes, 2015).

3.1.5. Manuseamento

Esta será a última fase do processo de triagem, onde se inclui um conjunto de equipamentos necessários à entrada, movimentação e saída dos resíduos na UTM. Exemplos de esses equipamentos são:

a) Dispositivos de pesagem

O dispositivo de pesagem mais comum numa estação é a ponte báscula, uma plataforma colocada no solo, numa via de acesso à portaria do centro de tratamento de resíduos. Desta forma, os veículos de recolha dos RU e os veículos de retoma do material são pesados à entrada e à saída das instalações, permitindo fazer um balanço mássico. Além da báscula, deverão existir no centro balanças electrónicas ou outros dispositivos de pesagem móveis, normalmente usados para os controlos de qualidade da própria UTM: verificação do peso e composição mássica dos fardos; estudos de caracterização dos resíduos ou do refugo, entre outros (Rodrigues, 2009).

b) Tapete transportador

Presente em quase todas as etapas das linhas do TM, o tapete transportador é o equipamento que permite alimentar os equipamentos ou evacuar os materiais após o tratamento. É preciso fazer notar que os tapetes metálicos são constituídos por lâminas, que encaixam umas nas outras para formar a superfície transportadora. Se as lâminas e a sua forma de encaixe forem bem concebidas, poderá evitar-se que materiais, como o papel, fiquem presos nas junções entre elas e provoquem o encravamento do tapete (Piedade & Aguiar, 2010; Rodrigues, 2009).

3.2. Metodologia de análise

O balanço mássico à linha de tratamento mecânico de RUB incidiu sobre a recolha de 4 m de amostra de RU que circulavam em cada um dos vários tapetes transportadores (CT) (conforme ilustrado no esquema da Figura 20): o CT 105, à saída do *trommel* 1; o CT 306, na linha de recolha dos resíduos finos à saída do separador balístico; o CT 107, à entrada do crivo; os CT 110/111/114, à saída do crivo; os CT 113/116/125, à saída dos aparelhos de raio X-112 e 115; o CT 117 tapete que conduz o material que vai para a CVO. As amostragens ocorreram entre 11/04/17 a 24/04/17 para todos os tapetes. A escolha do tamanho da amostra advém das orientações da Valorga, que ditam que para obter uma amostra representativa, esta terá de ter o equivalente a 10 L. Após meses de amostragens, a Ferrovial Serviços concluiu que amostrar 4 m de tapete seria o comprimento ideal para preencher este requisito.

Após a recolha de amostras procedeu-se à sua pesagem. Seguidamente, para caracterizar o material em estudo executou-se a triagem das várias frações que compunham a mistura. O processo de triagem não foi igual para todos os tapetes:

- Nos CT 105/107/114/306: as amostras foram triadas com um peneiro com 10 mm de malha, sendo o material separado em MO (carne, peixe, fruta, vegetais, restos de jardim, papel, madeira, cartão e ossos), plásticos, metais ferrosos, metais não ferrosos, inertes (vidro, pedras e conchas), finos (material que conseguia passar pelos orifícios da malha) e rejeitados (têxtil e têxteis sanitários);
- Nos CT 113/116/120/125: a caracterização das várias frações foi feita através de dois peneiros com malhas de 50 e 20 mm, sendo o material separado segundo o seu tamanho (maiores que 50 mm, maiores e menores que 20 mm). Antes da triagem se iniciar, recolhia-se duas porções de amostra para colocar na estufa, e posteriormente na mufla, no intuito de proceder à análise de inertes com tamanhos a variar entre 0,5 a 60 mm. Paralelamente, o material foi separado em MO, filmes plástico, plástico, têxteis, madeira, vidro, pedras, metais, conchas e ossos. Após a triagem, recolhia-se duas

amostras de resíduos menores 20 mm para o estudo do teor de inertes com tamanhos entre 1 a 20 mm.

- Os tapetes CT 110/111 foram alvo de outro tipo de análise: a amostra proveniente do CT 110 foi simplesmente pesada; a amostra do CT 111 foi introduzida na estufa, e posteriormente na mufla. Com os dados adquiridos foi possível calcular o rendimento dos vários mecanismos de triagem da linha de TM dos RUB.

A 11/05/17 procedeu-se ao teste de rendimento à linha do TM. A preparação para o teste exigiu que toda a linha fosse limpa, incluindo todas as caixas, compactadores e contentores que recebem resíduos. O cais de entrada foi balizado por forma a receber durante o teste resíduo proveniente da recolha indiferenciada. Para executar o teste, através da báscula pesou-se uma amostra de 30,3 ton que foi sujeita ao método do quartil. Este método baseia-se em contruir um cone com a amostra, para depois espalha-la sob a forma de uma bolacha. A amostra foi repartida em 4 pedaços: dois eram retirados, sendo considerados rejeitados; os outros dois permaneciam para formar um novo cone. Este processo prosseguiu até se obter uma amostra com mais ou menos 130 kg. Para caracterizar o resíduo à entrada da UTM, foi recolhida uma amostra para a sua caracterização à posteriori. Por fim, a linha arrancou tendo-se desviado a MO para o piso móvel. No final pesaram-se todas as saídas de material. O método do quartil foi também aplicado à matéria orgânica que foi desviada para o piso móvel, e posteriormente ao rejeitado da linha de separação, tendo-se recolhido uma amostra para caracterização à posteriori. Em ambos os casos, a MO foi desviada para a saída.

3.3. Apresentação de resultados

3.3.1. Teste de rendimento à linha de TM

Da análise do gráfico apresentado na Fig.16, conclui-se que a amostra do cais de entrada é composta maioritariamente por MO e contem um teor apreciável de plásticos, papel/cartão e “Outros”, sendo esta última fração correspondente a inertes e indiferenciados, cujo peso ponderal na amostra não é muito inferior a fração de MO.

Na projeção da UTM realizada em 2011, estipulou-se para o peso ponderal de cada fração de resíduo da mistura, recebida no cais de entrada, os valores indicados na Tabela 2, os quais não se mantiveram estáveis, ao longo de tempo, por se terem alterado as variáveis que condicionavam a produção de resíduo (e.g. diminuição de população, aumento de consumo e adesão à reciclagem). Perante esta evidência e sendo necessário efetuar uma análise correta, é importante a comparação dos valores contidos na Fig.16 e Tabela 2 com

os da Fig.34 (Anexo D). Comparando os resultados obtidos com a Tabela 2, verificou-se que: os teores de MO, plástico, finos, papel/cartão e têxtil, obtidos na amostragem foi menor do que o esperado; o teor de "Outros" aumentou bastante; o aumento do teor de vidro foi mais moderado; e o teor de metal manteve-se. Estes indicadores podem ter origem em aspetos demográficos, nomeadamente o envelhecimento e a diminuição da população da região abrangida pela AMRPB desde 2011 (Fig.34 – Anexo D) e uma menor produção de resíduos (comparativamente a 2011) (Fig.35 – Anexo D), sendo esta última possivelmente associada às dificuldades económicas das famílias, devido à crise económica que se fez sentir na primeira metade da década, podendo resultar também numa alteração da composição macroscópica desses resíduos.

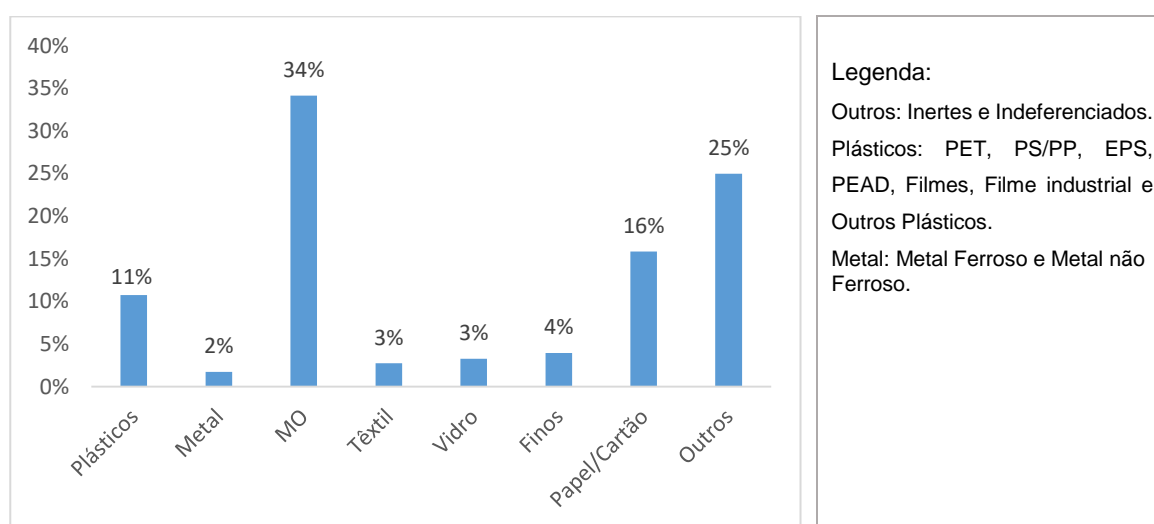


Figura.16 - Caracterização da amostra de entrada na linha do TM

Tabela 2 – Valores estimados para a caracterização da amostra de entrada na linha do TM (Fonte: Ferrovia Serviços, 2016)

| Fração de resíduo | % |
|-------------------|-------|
| MO | 48,60 |
| Papel/Cartão | 14,10 |
| Têxtil | 4,80 |

| | |
|------------------|-------|
| Plásticos | 11,90 |
| Vidro | 2,30 |
| Metal | 2,00 |
| Outros | 7,40 |
| Finos | 8,90 |

A Figura 17, realça os resultados obtidos na caraterização da amostra, provenientes da matéria orgânica armazenada no piso móvel, sendo: 80,7% da massa da amostra MO; o teor em inertes reduzido; a fração "Finos" composta por resíduos com tamanho inferior a 10 mm sendo que maior parte da sua massa também era composta por MO. Tudo isto realça a eficiência dos mecanismos da UTM na separação de MO do resto dos resíduos.

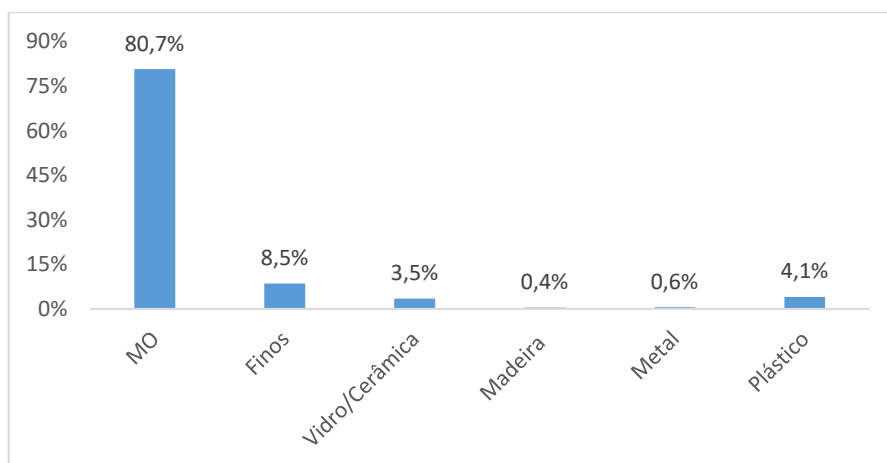


Figura 17 – Caraterização da amostra de MO desviada para o piso móvel. O componente Finos corresponde à fracção menor que 10 mm.

A Figura 18 revela os resultados obtidos na caraterização da amostra de rejeitados da linha de separação, onde é possível verificar que a triagem mecânica de RU descarta quantidades apreciáveis de resíduos valorizáveis como será o caso de Cartão/Papel, cujo teor representa 20,9% da massa da amostra. Outras frações como a MO, PEAD e Outros Plásticos representam um peso ponderal elevado na amostra.

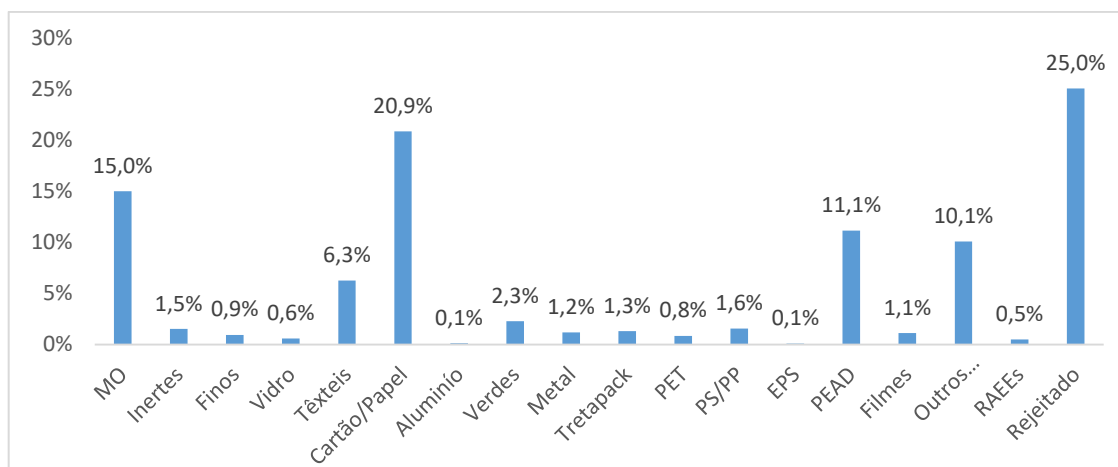


Figura 18 – Caracterização da amostra de rejeitado

Por último, a Figura 19 caracteriza o rendimento geral da linha do TM denotando que no tratamento dos resíduos indiferenciados a quantidade de rejeitados é muito superior à quantidade de MO e de resíduos valorizáveis. Contudo, é necessário referir que o erro associado a este teste é de 3%, sendo inferior ao valor limite admissível pela Ferrovia Serviços, em 5%, pelo que se considera válido este teste.

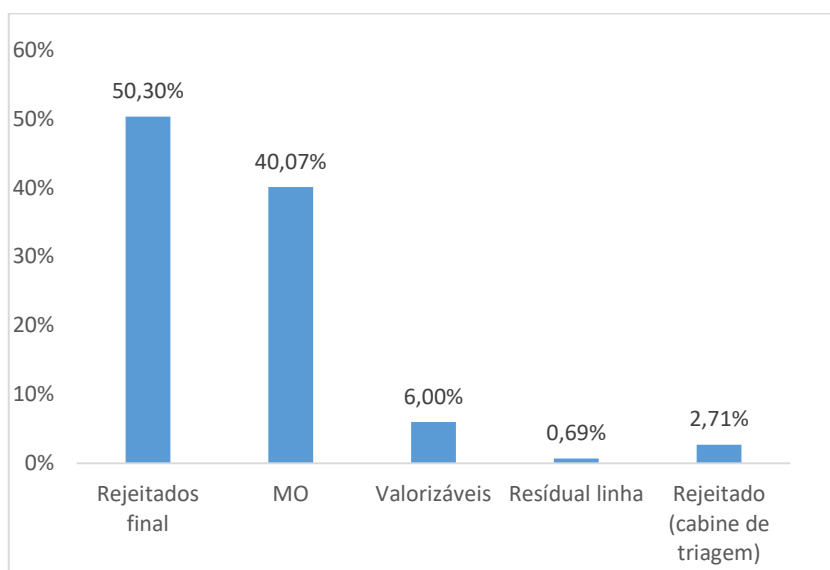


Figura.19 - Caracterização do rendimento geral da linha do TM

3.3.2. Balanço mássico à linha de TM de RUB

A Figura 20 permite salientar alguns aspetos:

- O caudal obtido no CT 107 é superior ao somatório dos caudais dos CT 306 e 105, sendo suposto que o seu caudal fosse menor dada a existência, à saída do CT 106, de um separador eletromagnético para retirar os metais ferrosos que possam existir na amostra. Comparando a soma dos caudais com o caudal do CT 107, é possível verificar

uma margem de erro de 4,2% (sem contar com a retirada de metais pelo separador eletromagnético que não foi equacionada). No entanto, apesar de ser uma percentagem considerável, segundo os parâmetros da Ferrovial Serviços, esta encontra-se abaixo de 5%, valor máximo admissível;

- O somatório dos caudais de saída do crivo é igual a 12,25 ton/h, apresentando um erro de 1,1% relativamente ao caudal de entrada pelo CT 107. Este valor encontra-se abaixo de 5%, considerando-se assim a diferença de caudais aceitável;
- Comparando a Fig.20 com a Fig.36 (Anexo E) é possível constatar diferenças no que diz respeito não só aos caudais, mas também à percentagem de massas. Estas diferenças terão origem em vários fatores: o período de amostragem ter sido relativamente curto (7 dias), conduzindo a grande margem de erro; mudança de malhas no crivo (30 – 60 mm para 20 – 60 mm; 8 – 30 mm para 10 – 30 mm); e instalação de um separador eletromagnético à saída do CT 106. Estes fatores terão permitido um maior caudal para o raio112 (diminuindo a sua eficiência) em detrimento do raio115, que recebe um caudal menor (promovendo uma triagem mais eficaz). Outra mudança, deve-se ao facto do CT 323, atualmente, não conduzir material para o CT 110 diminuindo a quantidade de resíduos que vai para o aterro;
- O separador balístico, também foi alvo de mudanças com a cobertura de cerca de 5% da área das suas placas, com o objetivo de promover o seu tempo de vida útil. Este pormenor poderá também ter influenciado a diminuição de caudal de resíduos finos para o CT 306.
- Comparada com a Fig.36, constata-se que ocorre atualmente uma menor produção de rejeitados na linha do TM para RUB em cerca de 4 ton/h a menos;
- Comparando com a Fig.36, verifica-se que atualmente conduz-se menos MO para a CVO, contabilizando-se menos 5,26 ton/h.

No período em que se efetuou o balanço mássico não foram considerados dois fluxos: os resíduos volumosos (e.g. paus e tubos) que ao serem introduzidos no crivo saem pela parte superior deste; a quantidade de poeiras que é captada pelo captador de poeiras no final dos raio X. A realização do balanço mássico permite verificar que cerca de 27% da amostra inicial é conduzida para a CVO.

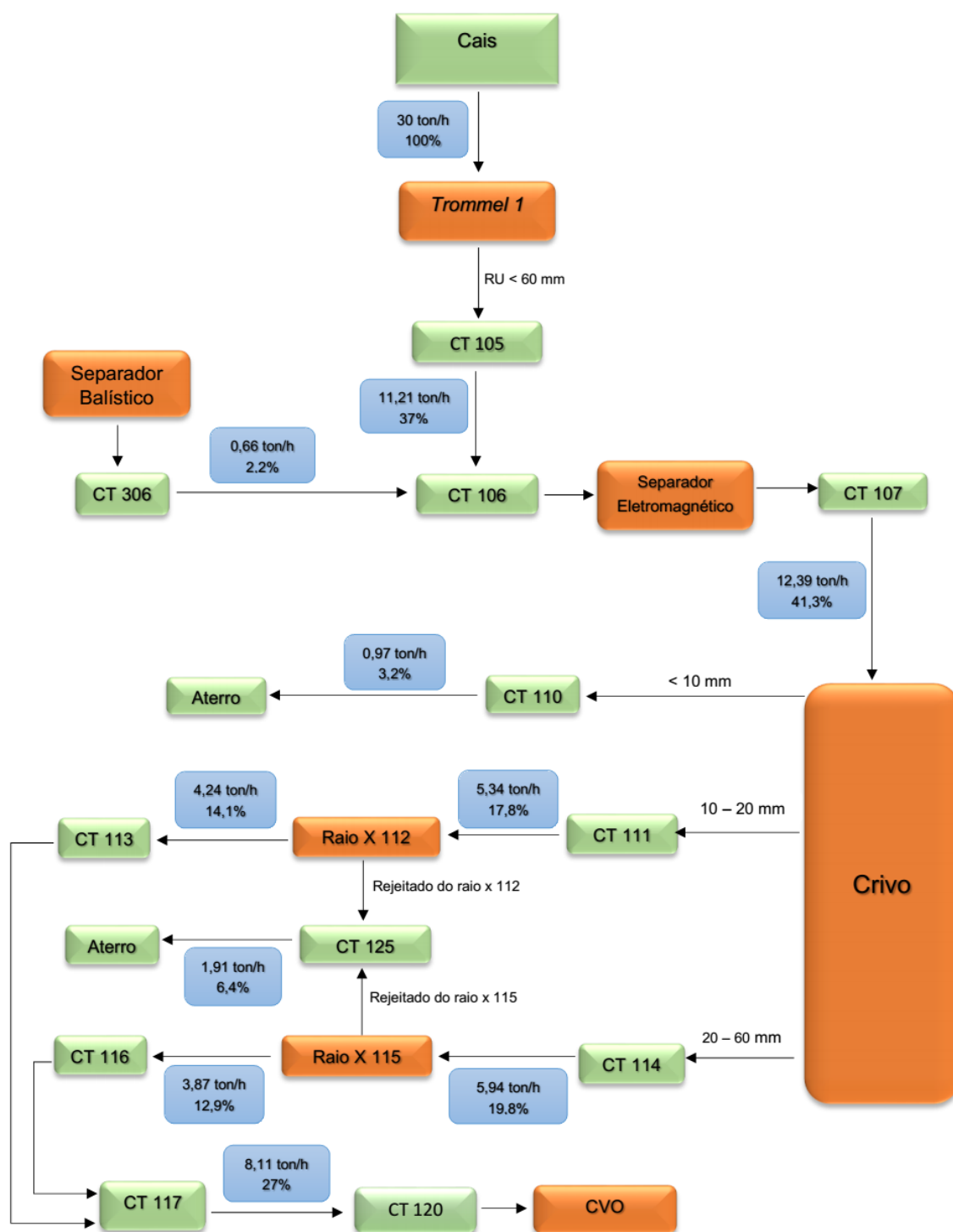


Figura 20 – Esquema do balanço mássico efetuado à linha dos RUB. As percentagens presenes no esquema são relativas à alimentação no Trommel 1.

Tabela 3 – Rendimento dos raios x na separação das diversas frações do resíduo

| Rendimento Raio-X considerando o aceite vs rejeitado | | | | | | | | |
|--|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fração de resíduo | Data de amostragem | | | | | | | |
| | 11/04 | 12/04 | 13/04 | 18/04 | 19/04 | 20/04 | 21/04 | Média |
| MO | 84% | 80% | 84% | 83% | 96% | 87% | 83% | 85% |
| Metal | 35% | 25% | 75% | 53% | 23% | 46% | 53% | 45% |
| Plástico | 13% | 17% | 11% | 4% | 0% | 29% | 18% | 13% |
| Inertes | 75% | 73% | 61% | 81% | 50% | 71% | 65% | 68% |
| Rejeitado | 28% | 4% | 19% | 22% | 11% | 28% | 18% | 19% |
| Fração < 20 mm | 85% | 78% | 91% | 89% | 95% | 83% | 90% | 87% |

A Tabela 3 indica que, em média, os dois raios X separaram cerca de 85% da MO recebida e 87% da fração menor que 20 mm. Relativamente ao restante material os aparelhos separaram da MO cerca de 45% de metal recebido, 13% de plástico, 68% de inertes e 19% de rejeitados.

3.4. Considerações finais

3.4.1. Teste de rendimento à linha de TM

Segundo os resultados obtidos no teste de rendimento à linha de TM, no final do processo de triagem: cerca de 53,7% do material de saída foi considerado rejeitado, tendo como destino o aterro; cerca de 40,07% desse mesmo material representa a quantidade de MO separada; e os resíduos valorizáveis representam apenas 6%. Esta situação demonstra que o atual desempenho da unidade não permite alcançar os objetivos propostos no PERSU 2020. Note-se que um deles é a preparação para reutilização e reciclagem de 13% para 80%.

Como sugestão de melhoria da unidade, sugere-se o cumprimento de algumas prescrições contidas no PERSU 2020:

- a) Para o desvio de resíduos valorizáveis de aterro para reciclagem, sugere:
 - A modernização das instalações de TMB, para otimizar a sua operação, garantindo níveis mínimos de eficiência e qualidade do serviço;
 - A definição de especificações técnicas para a retoma de materiais do TM;
 - O desenvolvimento de campanhas específicas para desviar determinados produtos reutilizáveis e recicláveis dos resíduos indiferenciados (e.g. consumíveis informáticos e resíduos de madeira);

- O reforço da aplicação do princípio do poluidor-pagador na região abrangida, pela diferenciação de sistemas de tarifação (fixo e variável) consoante a produção de resíduos (e.g. pagamento em função dos resíduos gerados).
- b) Medidas que limitam o desvio de refugos e rejeitados provenientes do tratamento de RU para aterro, com:
- O reforço das UTM com linhas de preparação/secagem de CDR;
 - A avaliação, em parceria com o setor industrial e sistemas de gestão de RU, da viabilidade de instalação de unidades de cogeração com recurso a CDR para fornecimento de eletricidade e calor.

Tendo em vista a avaliação do potencial energético dos rejeitados produzidos no Planalto Beirão foi conduzido um estudo, entre março de 2014 a maio de 2016, sob a orientação da Doutora Engenheira Isabel Brás (Departamento de Ambiente do Instituto Politécnico de Viseu). Neste estudo foram tidas em consideração as diretrizes da norma portuguesa NP 4486:2008 que estabelece um sistema de classificação de CDR baseado em valores limite para os três parâmetros seguintes, utilizando a seguinte apresentação de dados (Brás, 2017):

- Poder calorífico inferior (PCI) – média aritmética em base tal e qual;
- Teor de cloro – média aritmética em base seca;
- Teor de mercúrio – mediana e valor do percentil 80 em base tal e qual.

As características ideais que um CDR deve apresentar são (Carvalho, 2011):

- Maximização do rendimento térmico da sua combustão (parâmetro PCI);
- Baixo efeito de corrosão dos órgãos da caldeira de combustão (parâmetro Cl);
- Baixos níveis de emissões (parâmetro Hg).

O código de classificação do CDR é determinado tendo em linha de conta as seguintes premissas: o mais alto dos valores estatísticos (mediana e valor do percentil 80) numa série de dados do mercúrio determina a sua classificação; cada parâmetro é dividido em cinco classes devendo ser associado um número de 1 a 5 e o código da classe será a combinação de três classificações, dado que os três parâmetros apresentam igual importância, sendo usados para descrever de um modo rápido, mas simplificado, o tipo de CDR. A Tabela 4 apresenta o sistema de classificação para os CDR.

Tabela 4 – Sistema de classificação para os CDR, segundo a norma portuguesa NP 4486: 2008

| Parâmetro | Média estatística | Unidades | Classe | | | | |
|---------------------------------|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Poder calorífico inferior (PCI) | Média | MJ/kg (btq) | ≥ 25 | ≥ 20 | ≥ 15 | ≥ 10 | ≥ 3 |
| Teor de cloro (Cl) | Média | % (bs) | ≤ 0,2 | ≤ 0,6 | ≤ 1 | ≤ 1,5 | ≤ 3 |
| Teor de mercúrio (Hg) | Mediana | mg/MJ (btq) | ≤ 0,02 | ≤ 0,03 | ≤ 0,08 | ≤ 0,15 | ≤ 0,5 |
| | Percentil 80 | mg/MJ (btq) | ≤ 0,04 | ≤ 0,06 | ≤ 0,16 | ≤ 0,3 | ≤ 1 |

Segundos os resultados obtidos pela investigação, os CDR provenientes da UTM apresentam um PCI de 15,53 MJ/kg, teor médio de cloro de 0,49% e um teor de mercúrio em 0,009 mg/MJ (mediana) e 0,016 mg/MJ (percentil). De acordo com a norma NP 4486:2008, o código de classe atribuído ao produto analisado será PCI 2; Cl 2; Hg 1. Quanto mais baixa forem as classes melhor é a classificação do CDR, isto é, com PCI mais elevado e baixos teores de Cl e Hg. Assim, segundo este estudo, é possível classificar o CDR proveniente da UTM como uma fonte de energia rentável e não prejudicial para o ambiente. Porém, é preciso frisar que esta classificação não é suficiente para um possível utilizador que necessita de uma descrição mais detalhada do combustível (NP 4486, 2008). Neste estudo, a Doutora Engenheira Isabel Brás também concluiu que: considerando os fatores de conversão para as centrais de energia com os valores caloríficos alcançados com os fluxos de rejeitados; considerando eficiências de 25% para a recuperação de energia e com os dados de produção de resíduos a partir de 2015; a produção de energia a partir da UTM pode atingir 1154 MWh / ano. Tendo em conta a composição física e química dos resíduos, é espetável que a combustão de CDR proveniente da UTM produza emissões de CO₂ em cerca de 0,247 kg CO₂-eq.kg⁻¹.

Todavia, cada uma das tecnologias disponíveis para aproveitamento de CDR exige requisitos específicos, nomeadamente a granulometria e a homogeneidade. Assim, para que possa haver aproveitamento de CDR no Planalto Beirão, é desejável que a UTM possua um triturador para promover a homogeneização prévia dos refugos bem como uma granulometria regular e reduzida. Os resíduos deverão passar pelo triturador após a sua passagem pelos raio x, para não por em causa o propósito da existência destes aparelhos na UTM.

3.4.2. Balanço mássico à linha de TM de RUB

Os resultados obtidos durante a realização dos ensaios experimentais permitiram alcançar o objetivo inicialmente proposto para a caracterização da linha do TM dos RUB, por forma

a permitir a seleção adequada da melhor tecnologia de tratamento. Concluiu-se que ocorre uma menor produção de rejeitados relativamente ao que foi previsto no dimensionamento do TM e, o caudal que conduz o material para a CVO também diminuiu. É necessário ter em conta que estas conclusões são fruto de um período de amostragem relativamente curto pois, para uma maior exatidão, sugere-se que se proceda a um balanço mássico durante uma semana em todos os meses e tendo em consideração as épocas de festas. Neste teste semanal ter-se-á em conta: os resíduos volumosos que saem pela parte superior do crivo; a quantidade de peças ferromagnéticas retiradas pelo separador eletromagnético; e a quantidade de poeira acumulada no captador a saída dos raios X.

Para a melhor compreensão dos resultados obtidos, é necessário ter em consideração que as amostras recolhidas nos diversos tapetes não possuíam as mesmas características físicas pois, durante as amostragens, a UTM encontrava-se parada, permitindo a recolha de material dos tapetes. Isto significa que as amostras localizadas a jusante, em comparação com as amostras a montante, poderão ser diferentes em termos de quantidade e de composição física. Este facto poderá ter originado caudais não coincidentes.

Capítulo 4. Caracterização da matéria orgânica segregada na UTM e do composto produzido na CVO

As características de um composto estão intimamente relacionadas com a natureza do substrato de que lhe deu origem, mas também com a tecnologia usada e condições operatórias. Neste sentido, nas primeiras secções deste capítulo são abordados os fundamentos do processo de compostagem e a tecnologia disponível na AMRPB.

Nas secções finais apresenta-se a metodologia e resultados da caracterização do substrato e do produto da CVO, ou seja: i) da matéria orgânica, destinada a digestão anaeróbia seguida de compostagem e ii) do composto.

A matéria orgânica caracterizada foi produzida na UTM durante o período em que decorreu o estágio. O composto foi produzido na AMRPB, meses antes do início do estágio e durante o primeiro ano de laboração da CVO.

A caracterização do produto intermédio da CVO, o digestato da digestão anaeróbia não foi possível realizar, como referido no capítulo de introdução, uma vez que ele não se apresentava representativo do normal funcionamento da CVO.

4.1. Descrição do processo de compostagem

Segundo Haug (1993), *“a compostagem pode ser definida como um processo de decomposição biológica e de estabilização de substratos orgânicos, sob condições que permitem o desenvolvimento de temperaturas termófilas, como resultado da produção biológica de calor”*. Durante o processo, a matéria orgânica é parcialmente mineralizada e humificada pelo oxigénio presente no ar, sendo classificado como um processo aeróbio e o produto final é um composto orgânico estabilizado, livre de organismos patogénicos e plantas infestantes. Os produtos maioritários do seu metabolismo são gases simples como H_2O e CO_2 , acompanhados pela libertação de calor, o que faz da compostagem um processo exotérmico.

Do ponto de vista operacional, as principais etapas de um processo de compostagem são as seguintes (Piedade & Aguiar, 2010):

- Pré-tratamento dos resíduos;
- Processo de decomposição biológica;
- Afinação do composto maturado.

4.1.1. Pré-tratamento

Esta fase consiste no tratamento mecânico dos resíduos sólidos e como já foi referido no capítulo 3 este tipo de tratamento destina-se a remover materiais indesejáveis ao processo

de valorização orgânica. A extensão desta fase depende fundamentalmente da tipologia dos resíduos, dos sistemas de degradação biológica e das características e grau de qualidade que se pretende para o composto (Piedade & Aguiar, 2010).

4.1.2. Decomposição biológica

O processo de decomposição biológica, tal como está descrito na Fig.21, pode ser dividido em 3 fases: mesófila, termofílica e maturação.

a) Fase mesófila

A fase mesófila ou hidrolítica é a primeira do processo, onde se assiste a um rápido aquecimento (até cerca de 45 °C) ocorrendo o aumento da atividade e crescimento das bactérias mesófilas que, por norma, já existem nos resíduos e que promovem a decomposição das substâncias químicas do substrato mais facilmente biodegradáveis. Desta atividade microbiológica intensa resulta a produção de ácidos orgânicos que diminuem o pH do sistema (de 6 a 4,5). Esta fase dura 2 ou 3 dias e de forma facultativa relativamente à existência do oxigénio (Marques, 2008). Devido ao aumento constante de temperatura, a população mesófila irá morrer, dando lugar a organismos termofílicos que conseguem sobreviver a temperaturas acima dos 45 °C (bactérias e fungos termofílicos) (Rynk et al, 1992).

b) Fase termofílica

Com o aumento da população termofílica, a temperatura eleva-se rapidamente para valores entre 55°-60 °C, iniciando assim a metabolização de macromoléculas como proteínas, lípidos e hidratos de carbono. Devido à metabolização de ácidos orgânicos formados na fase mesófila, irá-se verificar nesta nova fase o aumento do pH para valores alcalinos. É de realçar que a fase termofílica implica a ocorrência de uma quantidade adequada de oxigénio e água e nestas condições são produzidos: dióxido de carbono, amoníaco e outros metabolitos intermédios; e calor, o que justifica o aumento crescente da temperatura podendo atingir os 70 °C. No entanto, se as temperaturas ultrapassarem este valor por um período de tempo extenso, a maioria dos microrganismos não sobreviverá pelo que a fase termofílica tem uma duração dependente da temperatura (Marques, 2008). Porém, à medida que o substrato orgânico começa a escassear, a intensidade dos processos metabólicos vai diminuindo, promovendo a descida da temperatura do sistema até que se aproxima da temperatura ambiente (Oliveira, 2015).

c) Fase de maturação

Quando o sistema atinge a temperatura ambiente, inicia-se a fase de maturação onde ocorre a colonização do material por populações mesófilas que realizam processos favoráveis à ocorrência de reacções de humificação, de degradação de compostos com biodegradabilidade mais lenta (e.g. a celulose e a lenhina) e o pH desce ligeiramente, atingindo valores da ordem de 7 a 8 no composto maturado. Esta fase tem duração variável entre algumas semanas a alguns meses (Oliveira, 2015; Piedade & Aguiar, 2010).

4.1.3. Afinação

No fim do processo de decomposição biológica, o composto pode ainda conter contaminantes, pelo que é necessário um processo de afinação destinado a remoção dos inertes indesejáveis e a calibração do produto obtido. Por norma, efectua-se depois da maturação do composto, mas pode ocorrer entre a fase de decomposição biológica e a da maturação. Em geral, contempla as seguintes operações (Piedade & Aguiar, 2010):

- Triagem de impurezas e inertes (vidros, plásticos, papéis), por crivagem, separação pneumática e balística;
- Redução da granulometria do composto por trituração.

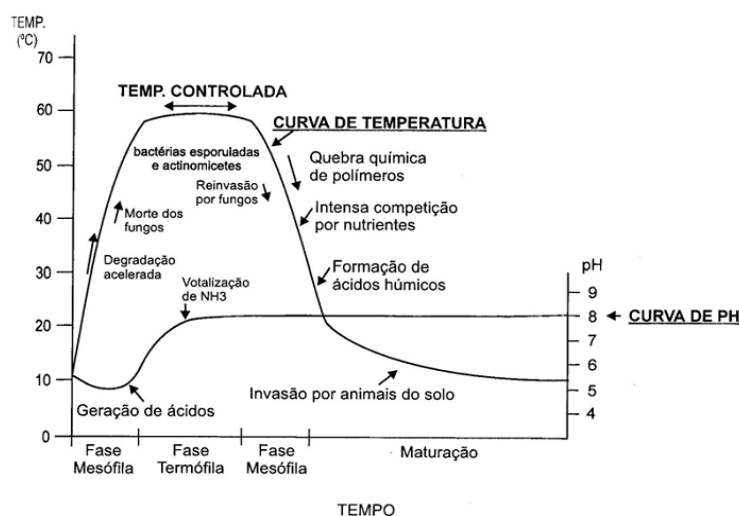


Figura 21 - Representação das diferentes fases que compõem o processo de compostagem (Adaptado de Sá, 2009)

4.2. Vantagens e desvantagens do processo de compostagem

a) Vantagens

Este processo apresenta inúmeras vantagens (Haug, 1993; Penacho, 2016):

- A aplicação de um composto orgânico estável na terra reduz o número de seres patogênicos para as plantas melhorando assim a sua resistência a doenças típicas de vegetais;
- O composto pode servir como condicionador de solos melhorando a sua estrutura física evitando a sua compactação, promovendo a drenagem, a circulação do ar e aumentando a capacidade de retenção de água pelo solo;
- Rápida decomposição microbiana e oxidação da MO;
- Pasteurização do material devido ao calor produzido nas reações exotérmicas presenciadas no processo;
- O composto apresenta uma fraca produção de odores pois a população orgânica que permanece após uma compostagem adequada é relativamente estável com baixas taxas de decomposição;
- Redução de massa e volume dos resíduos;
- Diminuição de RUB a ser enviados para aterro;
- Tratamento menos dispendioso relativamente a outros tipos de tratamento quando se entra em consideração com os ganhos ambientais resultantes;
- Maior parte dos sistemas de compostagem usam pouca quantidade de energia externa para funcionar quando comparados com outros sistemas de tratamento.

b) Desvantagens

A compostagem também apresenta as suas desvantagens (Penacho, 2016; Tchobanoglous & Kreith, 2002; Marques, 2008; Martins, 2013):

- Perda de azoto na forma de NH_3 ;
- Custo de equipamentos (inicialmente e durante a operação);
- Maior necessidade de área de terreno disponível relativamente a outros processos de tratamento como a biometanização;
- Maior utilização de mão-de-obra (em certas circunstâncias pode não ser desvantajoso pois absorve mão-de-obra, quase sempre não especializada);
- A compostagem em *windrow* pode apresentar potenciais problemas operacionais se for sujeita a condições meteorológicas adversas;
- Necessidades de realizar uma pré-triagem do material para que não ocorra a presença de produtos de decomposição lenta e que contenham metais pesados;
- Monitorização cuidada ao longo do processo para que não ocorra a formação de maus cheiros nem perda excessiva de humidade do material;

- Apesar do composto obtido conter vários nutrientes valiosos para a terra (o azoto e o fósforo), é errado pensar que este pode ser utilizado como um fertilizante convencional pois, por norma, o composto não apresenta teores de macro e micro nutrientes suficientemente altos para ser classificado como fertilizante.

4.3. Método de compostagem

O método usado na AMRPB é o Sistema Reator Horizontal (*Horizontal In-Vessel System*), característico pelo uso de longos canais paralelos, com cobertura e separados por paredes no sentido longitudinal, onde uma máquina efetua o revolvimento do material a compostar, arremessando-o na direção do fim do canal à medida que passa, (Graves et al, 2010). As máquinas de revolvimento de material desfazem aglomerados, promovem a sua homogeneização e garantem a manutenção duma adequada porosidade e o seu funcionamento é automático, dispensando a necessidade de um operador. O revolvimento espaçado permite o arejamento que é executado por bombas de ventilação que inserem o ar no material a compostar e promovem o seu arrefecimento. Uma vez que o material ao longo do canal se encontra em diferentes fases de decomposição, o canal é constituído por diferentes zonas de arejamento, onde bombas de ventilação fornecem diferentes quantidades de ar. Estas bombas são controladas individualmente por um temporizador ou um sensor de temperatura (Costa, 2014). Os canais são construídos sob uma base de cimento ou de material poroso como cascalho de forma a permitir um maior fluxo de ar na base da mistura. Geralmente é necessário um período de maturação prolongado (1 a 2 meses) (Costa, 2014; Rynk et al, 1992). A Figura 22 ilustra este método de compostagem. Em Anexo F, encontram-se outros tipos de métodos de compostagem, sendo possível consultar o seu modo de funcionamento.

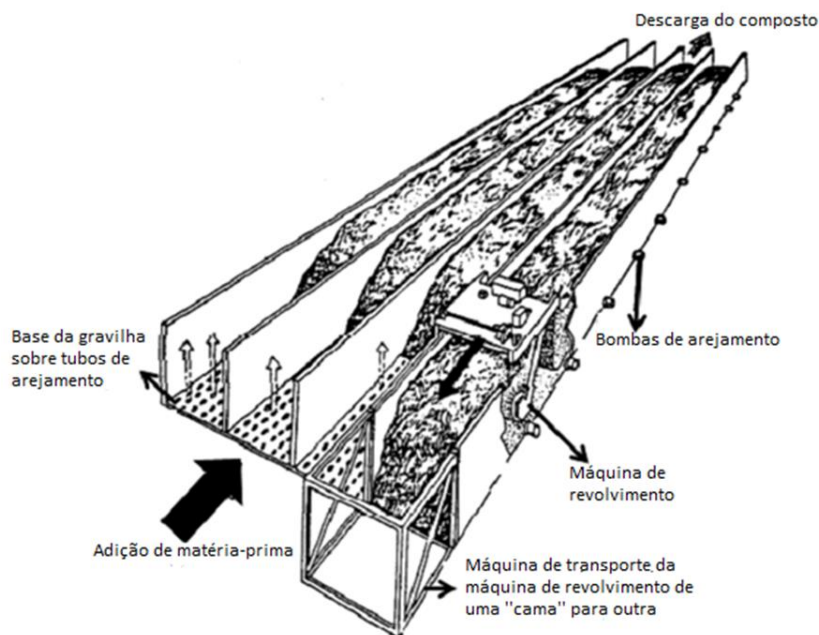


Figura 22 - Representação esquemática do sistema de "camas" agitadas (Adaptado de Rynk et al, 1992)

4.4. Fatores relativos às características do substrato

Segundo Souza (1984), para fazer face as necessidades de azoto e fósforo das bactérias responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia, o resíduo deve conter concentrações destes componentes, em relação ao seu conteúdo de carbono e que satisfaçam as seguintes relações:

$$C/N \leq 30 \text{ e } C/P \leq 150$$

Quando não se verifica a existência de N e P em quantidades suficientes, estes devem ser adicionados. No entanto, resíduos que contenham concentrações demasiado elevadas de azoto total, podem provocar inibição do processo de digestão, visto que uma parte considerável do nitrogénio total é transformada, no digestor, em nitrogénio amoniacal.

4.5. Parâmetros de controlo no processo de compostagem

Sendo os seguintes:

a) Nutrientes / Razão C:N

A degradação da MO resulta da atividade microbiológica devido à presença de nutrientes (macro e micronutrientes), isto é, elementos que funcionam como fonte energética e que garantem a reprodução e a função metabólica dos organismos (Gomes, 2001).

O azoto é considerado o macronutriente (orgânico e inorgânico) com maior influência na produção agrícola e hortícola apresentando-se nas formas amoniacal, nítrica e nitrosa. A

sua utilização excessiva pode causar impactos ambientais negativos derivados da mobilização de nitratos através de lixiviados, contaminando assim solos e águas subterrâneas (Oliveira, 2015).

Um dos parâmetros mais importantes da compostagem é a razão carbono/azoto, uma vez que o carbono é essencial para as funções vitais dos microrganismos e o azoto é indispensável à formação de novas células. Estes dois nutrientes afetam assim a velocidade de crescimento dos microrganismos (Gomes, 2001). Segundo Haung (1993), o valor ideal para a razão carbono/azoto inicial encontra-se na gama entre 30 a 35, sendo que: a razão inferior a estes valores determina um processo de degradação mais rápido, não havendo carbono suficiente para converter o azoto em material celular e causando perda de nutrientes e libertação de azoto sob a forma de amoníaco; acima da referida gama, o tempo de compostagem aumenta juntamente com o valor de carbono/azoto. A falta de azoto disponível face ao carbono existente implicará um retardamento na formação de novas células, atrasando o processo de degradação. A adição de papel ou de outros materiais celulósicos permitem aumentar as relações carbono/azoto demasiado baixas (Russo, 2003).

b) pH

O nível de pH da matéria-prima, da mistura a compostar, não tem grande impacto sobre o processo de compostagem porque os diferentes microrganismos, presentes no processo, apresentam diversas gamas de valores ideais de pH as quais, segundo Graves et al (2010), variam entre 6,5 a 8,0. Note-se que em situações onde se verificam valores extremos de pH, como 5 ou 9, o processo abrande e em algumas situações (e.g. se ocorrer formação de condições ácidas nos estádios iniciais da compostagem, causando um período prolongado de latência) pode ser necessário ajustar o nível de pH (Graves et al, 2010). No entanto, devido a questões económicas e de conservação do azoto no material em compostagem, o ajustamento de pH pode-se revelar tarefa difícil de por em prática (Gomes, 2001). Apesar de não ser considerado um parâmetro crítico, valores de pH baixos também podem provocar: problemas ao nível do equipamento (e.g a corrosão); ao nível da qualidade do composto implicando uma decomposição da MO mais lenta; emitir maus odores; mais dificuldade em atingir temperaturas suficientemente altas para garantir a pasteurização do substrato e a obtenção de um composto com qualidade. Para valores a rondar os 10 verifica-se um período de latência que pode durar vários dias (Oliveira, 2015).

c) Temperatura

A temperatura é o parâmetro que exige mais atenção pois pequenas variações podem afetar bastante a população microbiológica (Gomes, 2001). Embora as temperaturas verificadas na fase mesófila permitam um processo de compostagem efetivo, muitos especialistas no assunto argumentam que se deve manter temperaturas termófilas entre os 44 °C e os 66 °C uma vez que as mesmas garantem a destruição da maioria dos seres patogénicos, sementes de ervas daninhas e larvas de insetos (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

O processo de compostagem é exotérmico pois a intensa atividade microbiana que se regista ao longo do processo leva à libertação de grandes quantidades de calor que libertado resulta no aquecimento do material em fermentação, sendo o controlo de temperatura feito por remeximento mecânico ou por insuflação de ar ambiente (Costa, 2014).

A maior parte da perda de calor que, eventualmente ocorre na compostagem, resulta da evaporação da água sendo que os materiais não devem ter um teor de humidade abaixo de 40%, sob o perigo da combustão espontânea do material (Rynk et al, 1992). Na Figura 23, é apresentado um perfil de distribuição de temperaturas típico para uma pilha de compostagem. Como se verifica, as maiores temperaturas registam-se no interior da pilha, facto que pode ser explicado pelas perdas de calor produzidas pela população microbiana ser menor do que à superfície (Costa, 2014).

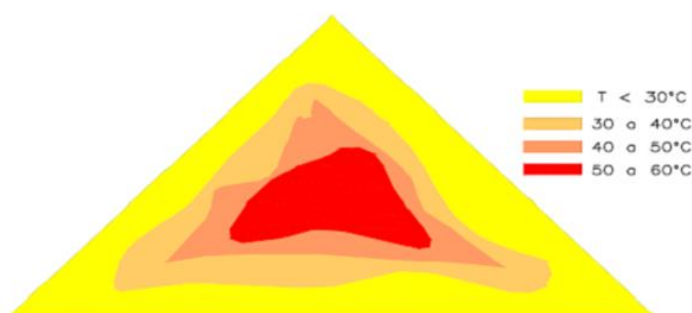


Figura.23 - Perfil de distribuição de temperaturas típico de uma pilha de compostagem (Adaptado de Costa, 2014)

d) Humidade

A humidade é necessária para suportar os processos metabólicos dos microrganismos pois a água fornece o meio para reações químicas, transporte de nutrientes e movimentação de microrganismos (Rynk et al, 1992). A humidade também é um parâmetro decisivo para obtenção de um produto final com boa qualidade pois, um composto seco é mais fácil de

manusear e não desenvolve maus cheiros quando armazenado (Gomes, 2001). De acordo com Golueke (1977), citado por Gomes (2001), o TH (teor de humidade) ideal num material a compostar deve estar entre 50 a 60%. Abaixo desta gama, a atividade microbiana abrande, retardando o processo de compostagem, podendo ser necessária a adição de água ou de matéria-prima com um conteúdo mais elevado de humidade. Acima de 60%, a água enche os poros existentes no material limitando a movimentação do ar, facto que favorece maior produção de águas lixivantes e maus odores devido ao surgimento de condições de anaerobiose.

O parâmetro humidade deve ser controlado desde do início do processo. Se for verificado excesso de humidade no início do processo, a correção pode passar por: secagem do material ao ar ou em estufa; adição de material já compostado e seco; adição de um agente estruturante, que para além de alterar o teor de humidade da mistura oferece estrutura e porosidade, favorecendo a passagem de ar. Uma vez iniciado o processo de correção, começa a produção de quantidades consideráveis de água que podem contribuir para humedecer o material (Oliveira, 2015). Mesmo sendo um processo exotérmico, o calor produzido pode não ser suficiente para evaporar este excesso originando lixiviados (Gomes, 2001). Se ao longo do processo se registar um TH baixo, há pelo menos duas soluções: irrigação da mistura com água; ou adicionar resíduos com um TH elevado.

e) Arejamento

O oxigénio é necessário à sobrevivência dos microrganismos aeróbios pois, se estes não tiverem acesso a uma certa quantidade de oxigénio, ocorrerá a proliferação de microrganismos anaeróbios na pilha de compostagem (Grades et al, 2010). A decomposição anaeróbia, geralmente considerada mais lenta e menos eficiente do que a decomposição aeróbia, gera calor insuficiente para evaporar a água dos materiais o que conduz ao desenvolvimento de compostos intermediários como o metano, ácidos orgânicos, sulfureto de hidrogénio e outras substâncias. Muitos destes compostos têm odores fortes, e alguns apresentam preocupações de segurança (Rynk et al, 1992).

O fornecimento de oxigénio também é necessário: para promover a remoção de humidade do material em compostagem; para a remoção dos gases resultantes da decomposição (e.g. CO_2 e NH_3); para evitar a compactação do substrato; e controlar a temperatura (principalmente por evaporação da água) (Costa, 2014). A temperatura do interior da pilha de compostagem é o parâmetro que melhor traduz a taxa de utilização do O_2 , sendo o melhor indicador da taxa de degradação da MO. Assim, a frequência do revolvimento deverá ser decidida em função deste parâmetro (Penacho, 2016). Segundo Matos et al

(2008), citado por Oliveira (2015), a concentração de oxigênio no ar no interior da massa a compostar deve manter-se entre 5 a 15 %.

f) Bulking Agents

Um *bulking agent* é um aditivo usado para fomentar a porosidade do material a compostar originando condições ótimas para a circulação de ar nesse material (exceto para os agentes de volume com partículas muito pequenas, tais como serradura). Para além disso, a adição de *bulking agents* secos, como aparas de madeira, permite controlar o teor de humidade da matéria-prima de entrada (como é o caso de lamas de ETAR, aparas de relva ou desperdícios alimentares). O ajuste da razão carbono/azoto e a promoção da qualidade do produto são outros objetivos da adição de *bulking agents* (Haug, 1993).

g) Granulometria

A granulometria do material a compostar é bastante importante para o processo de compostagem pois tem influência na sua execução. A superfície específica das partículas do material a compostar é determinada por este parâmetro uma vez que, com a diminuição do diâmetro das partículas, se regista o aumento da referida superfície e aumenta assim a eficiência da degradação da MO. Outro aspeto a considerar é o tamanho das partículas, pois quanto menor for o seu diâmetro mais facilitado será o acesso do oxigênio ao interior da pilha. Assim, é usual proceder à redução e uniformização do tamanho das partículas antes do início do processo de compostagem. No entanto, as partículas não devem ter tamanho muito reduzido pois esse tipo de situação leva a formação de agregados (aumentando o risco de compactação de água e de ar), tornando o material mais pastoso e mais difícil de manusear (Penacho, 2016). Segundo Mendes (2011), as partículas devem ter um diâmetro compreendido entre 1,3 a 7,6 cm.

4.6. Parâmetros de caracterização e avaliação da qualidade do composto

Tais como:

a) Metais pesados

Consideram-se metais pesados os elementos cujas densidades sejam iguais ou superiores a $5,0 \text{ g.cm}^{-3}$, compreendendo cerca de 40, onde se incluem elementos como o Pb, Hg, Cu, Ni, Cd, Cr, Ag, Mg e Fe. No âmbito de engenharia do ambiente, apenas alguns metais pesados são considerados críticos, pois estes podem ocorrer com frequência em concentrações tóxicas nos RU como é o caso do Pb, Hg, Cu, Ni, Cd, Cr e Mg (Russo, 2003).

b) Elementos minerais

O conhecimento dos teores dos elementos minerais que podem ser encontrados num composto é importante, sobretudo na sua utilização enquanto corretivo para suprir as necessidades de nutrientes do solo. Elementos como o azoto, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre (os macronutrientes) são necessários em quantidades mais elevadas. Já elementos como o ferro, zinco, cobre, boro, molibdénio e cloro (os micronutrientes), são necessários em quantidades mais diminutas (Oliveira, 2015).

c) Azoto e relação carbono/azoto

O teor de azoto total no composto: não é considerado um parâmetro de estabilidade e de maturação; mas é um bom indicador do valor fertilizante do mesmo. No entanto, a legislação vigente o Decreto-Lei nº103/2015, de 15 de junho e a "Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto", não fornecem indicações precisas sobre a real disponibilidade do azoto para as culturas pelo que é usual a prática de teores de azoto situados na gama de valores 12-20, dado que valores superiores podem resultar no sequestro de azoto presente no solo (Oliveira, 2015).

d) pH

O valor de pH de um composto está associado aos materiais que lhe dão origem, ao processo de compostagem utilizado e à sua evolução. Note-se que valores extremos de acidez ou alcalinidade podem prejudicar ou mesmo inibir o crescimento das raízes das plantas (Oliveira, 2015). Segundo o Decreto-Lei nº103/2015, de 15 de junho, o pH dos compostos geralmente varia entre 5,5 a 9.

e) Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) exprime a capacidade que uma solução tem para conduzir corrente elétrica e é expressa em diSiemens por metro (dS.m^{-1}). Através deste parâmetro é possível quantificar o teor de sais solúveis presente num composto ou material embora a CE não forneça informação sobre o tipo de sais presentes.

Altas concentrações de sais podem causar problemas de fitotoxicidade. Assim, o conhecimento da CE do composto permite contribuir para a avaliação da utilização do composto mais compatível com as características do solo a que se destina (Peneiro, 2016).

Segundo Mendes (2011), o valor máximo de CE num composto para aplicação no solo será de 3 dS m⁻¹.

f) Odor e Cor

Os parâmetros odor e cor são bons indicadores da forma como decorre o processo de compostagem. Se no decorrer do processo, os odores desagradáveis provocados pela decomposição da MO dão lugar a um cheiro de terra húmida, turfa ou húmus, é sinónimo que se obteve um processo de degradação eficaz. Ainda no decurso do processo se este não estiver a ser conduzido de maneira correta ocorre a formação de odores fortes, fruto da criação de zonas anaeróbias no interior da pilha de compostagem, traduzindo-se num abrandamento da velocidade do processo de degradação da MO e que o processo em si está a tornar-se menos eficiente. A cor da mistura deve evoluir, de forma homogénea, a partir da cor inicial para um castanho escuro homogéneo. Quando alguns dos resíduos presentes mantêm a cor original, esse facto indica a sua reduzida biodegradabilidade, ou a existência de condições desfavoráveis a esse processo (Haug, 1993).

g) Humidade

A humidade é, também, um parâmetro fundamental no processo de maturação do composto, dado que continua a ser necessária à atuação de microrganismos. Para o composto final, o Decreto-Lei nº103/2015, de 15 de junho, estipula para um TH ideal uma referência inferior a 40%. É de realçar que um composto que apresente teores de humidade baixos pode ter sido armazenado em tempo excessivo. Abaixo dos 35%, o composto pode não estar totalmente estabilizado. Um composto com um teor de humidade demasiado baixo tem ainda tendência a pulverizar tornando-se o seu manuseamento menos agradável (Oliveira, 2015).

h) Microorganismos

Tal como foi referido anteriormente, a compostagem é um processo de fermentação biológica onde os intervenientes principais deste processo são os microrganismos, que garantem a decomposição da MO e para os quais devem ser mantidas condições de temperatura, pH e arejamento ótimas (Penacho, 2016). Este processo é caracterizado tanto por temperaturas mesofílicas como termofílicas, ocorrendo limites para a atividade biológica. Temperaturas superiores a 70°C constituem um limite para a atividade biológica, ocorrendo a esterilização do composto devido à morte de todos os organismos presentes,

sejam eles benéficos ou patogénicos (Levy & Cabeças, 2006). Os requisitos da EPA (*Environmental Protection Agency*) para uma redução significativa de organismos patogénicos são que, em qualquer sistema, o material seja mantido a 40°C por um período mínimo de 5 dias e que se atinja os 55°C durante um período de 4 horas. Uma redução adicional de patogénicos pode ser conseguida mantendo a 55°C durante três dias, nos sistemas ventilados abertos ou fechados. No caso de pilhas estáticas, os resíduos devem ser mantidos a 55°C durante 15 dias com um mínimo de 5 agitações (Oliveira, 2015).

4.7. Requisitos legais de qualidade do composto

O controlo de qualidade do composto final, bem como o controlo e monitorização de todo o processo de tratamento são aspetos importantes a considerar numa CVO (Levy & Cabeças, 2006). A qualidade do composto final pode variar consoante a origem e características da matéria-prima e bem como das condições de realização do processo de compostagem. A qualidade do produto final é garantida pelo cumprimento de determinados critérios, cuja avaliação se faz através de parâmetros adequados, para os quais se estabelecem valores limites que visam garantir a estabilidade química, a higienização e uma adequada composição do composto (Penacho, 2016).

Feitas estas considerações, pode-se dizer que no final do processo de compostagem deve-se obter um composto com características físicas, químicas e biológicas que permitam a sua aplicação como elemento estruturante dos solos. Os parâmetros de qualidade para o composto final ainda não foram estabelecidos pela Comissão Europeia, embora alguns países já possuam normas estabelecidas a nível nacional. No caso concreto de Portugal, em 2008 foi elaborada uma proposta para as Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto (Penacho, 2016). Esta proposta teve em conta o 2nd Draft do Documento de Trabalho sobre o Tratamento Biológico de Resíduos Biodegradáveis (DG-ENV. A.2, 2001), de fevereiro de 2001, e o Documento de Trabalho sobre Lamas e Resíduos Biológicos (DG-ENV. A.2/LM, 2003), de dezembro de 2003. Neste âmbito, com base nas concentrações em metais pesados, materiais inertes antropogénicos, pedras e microrganismos patogénicos no composto, estabelecem-se, como se vê na Tabela 5, três classes de qualidade: Classe I, Classe II e Classe III, admitindo-se uma quarta (Classe IIA).

Tabela 5 - Utilização da matéria fertilizante de acordo com a classe. (Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho)

| Classe de matéria fertilizante | Utilização |
|--------------------------------|--------------|
| Classes I e II | Agricultura. |
| Classe IIA | |

| | |
|-------------------|--|
| | Culturas agrícolas arbóreas e arbustivos nomeadamente pomares, olivais e vinhas. Espécies silvícolas. |
| Classe III | Solo onde não se pretenda implantar culturas destinadas à alimentação humana e animal |
| | Cobertura final de aterros e lixeiras, pedreiras e minas, tendo em vista a restauração da paisagem |
| | Cobertura de valas e taludes, no caso da construção de estradas (integração paisagística) |
| | Fertilização de solos destinados à silvicultura (espécies cujo fruto não se utilize na alimentação humana ou animal) |
| | Culturas bioenergéticas |
| | Jardinagem; produção florícola (excluem-se as culturas edíveis) |
| | Campos de futebol e de golfe |

Neste contexto, entrou em vigor em Portugal o Decreto-Lei n.º103/2015, de 15 de junho, relativo aos valores limites para colocação no mercado das matérias fertilizantes. Até ao aparecimento desta legislação, as estações de compostagem nacionais, recorriam a normas de outros países da Comunidade Europeia. Este Decreto-Lei, do ponto de vista do composto proveniente da recolha indiferenciada de RU, enuncia no ANEXO I - Grupo 5, que a tipologia do composto obtido é a N.º 1 – Corretivo Composto, que é um corretivo orgânico, “corretivo agrícola de origem vegetal, ou de origem vegetal e animal, utilizado principalmente com o objetivo de aumentar o nível de matéria orgânica no solo” (Capítulo I, Artigo 3.º), como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas: Grupo 5- Corretivos orgânicos. (Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho)

| Nº | Denominação do tipo | Indicações relativas ao processo de obtenção e aos componentes essenciais | Teores mínimos de elementos e/ou substâncias úteis. Outras indicações. | Outras indicações relativas à denominação do tipo. | Elementos ou substâncias úteis cujo teor deve ser declarado. Outros critérios. |
|----|---------------------|---|--|--|--|
|----|---------------------|---|--|--|--|

| | | | | | |
|---|---|--|--|--------------------------------|---|
| 1 | Corretivo Composto. | Produto obtido mediante processo controlado de transformação e estabilização de resíduos orgânicos, que constam no anexo IV. | Corretivo composto com os requisitos constantes no anexo II. | Composto Orgânico. Compostado. | 1 — Matérias-primas; 2 — Humidade; 3 — pH; 4 — Condutividade elétrica; 5 — Massa volúmica aparente; 6 — Matéria orgânica; 7 — Azoto (N) total; 8 — Fósforo (P ₂ O ₅) total; 9 — Potássio (K ₂ O) total; 10 — Cálcio (CaO) total; 11 — Magnésio (MgO) total; 12 — Relação C/N; 13 — Boro (B) total; 14 — Cádmio (Cd) total; 15 — Chumbo (Pb) total; 16 — Cobre (Cu) total; 17 — Crómio (Cr) total; 18 — Mercúrio (Hg) total; 19 — Níquel (Ni) total; 20 — Zinco (Zn) total; 21 — Grau de maturação; 22 — Granulometria; 23 — Materiais inertes antropogénicos; 24 — Salmonella spp.; 25 — Escherichia coli.; 26 — Sementes e propágulos de infestantes. |
| 2 | Corretivos resultantes do substrato utilizado na produção de cogumelos. | Produto resultante do substrato utilizado na produção de cogumelos em câmara com atmosfera controlada. | Corretivo resultante do substrato utilizado na produção de cogumelos com os requisitos constantes no anexo II. | | |
| 3 | Vermicomposto. | Produto estabilizado obtido essencialmente a partir da digestão de materiais orgânicos por minhocas, em condições controladas. | Corretivo obtido essencialmente a partir da digestão de materiais orgânicos por minhocas com os requisitos constantes no anexo II. | | |

Encontram-se na Tabela 7 os requisitos analíticos aplicáveis a fertilizantes e outros componentes orgânicos mais comuns, inseridos no Grupo 5 (corretivos orgânicos).

Tabela 7 - Requisitos aplicáveis às matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, ANEXO II)

| Nº | Parâmetro | Requisito / Valor Máximo Admissível (VMA) |
|----|------------------|--|
| 1 | Matéria orgânica | As matérias fertilizantes constituídas, total ou parcialmente por resíduos orgânicos, devem conter um teor mínimo de 30% de matéria orgânica (reportado à matéria seca). |
| 2 | Humidade | |

| | | |
|---|--|---|
| | | O teor máximo de humidade, expresso em percentagem em massa, permitido na matéria fertilizante é de 40%, sem prejuízo do disposto no n.º 5 do artigo 36º. |
| 3 | Granulometria | De um modo geral, 99% do material que constitui a matéria fertilizante deve passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm. |
| 4 | pH | O pH da matéria fertilizante deve situar-se entre 5,5 e 9,0. |
| 5 | Fitotoxicidade | A matéria fertilizante de origem orgânica é considerada não fitotóxica desde que o índice resultado da sua submissão a um dos testes de fitotoxicidade do anexo V ao presente diploma revele ausência de fitotoxicidade |
| 6 | <i>Salmonella spp.</i> | Ausente numa amostra de 25 g de matéria fertilizante produzida. |
| | <i>Escherichia coli.</i> | <1000 células/g de matéria fertilizante produzida. |
| | Sementes e propágulos de infestantes | 3 unidades ativas/Litro |
| 7 | Valores máximos admissíveis para os teores «totais» de metais pesados na matéria fertilizante com componentes orgânicos (miligramas por quilogramas de matéria seca). Classe II A | |
| | Cádmio (Cd) | 3 |
| | Chumbo (Pb) | 300 |
| | Cobre (Cu) | 400 |
| | Crómio (Cr) | 300 |
| | Mercúrio (Hg) | 3 |
| | Níquel (Ni) | 200 |
| | Zinco (Zn) | 1000 |

A Tabela 8 expressa os valores máximos admissíveis para a quantidade de pedras e materiais inertes antropogénicos a encontrar num composto.

Tabela 8 - Valores máximos admissíveis para os teores «totais» de materiais inertes antropogénicos, pedras de granulometria superior a 5 mm na matéria fertilizante com componentes orgânicos RU. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, ANEXO II)

| Parâmetro | Matéria Fertilizante | | | |
|--|----------------------|-----------|-------------|------------|
| | Classe I | Classe II | Classe II A | Classe III |
| Materiais inertes antropogénicos (%)* | 0,5 | 1 | 2 | 3 |
| Pedras > 5 mm (%) | 5 | 5 | 5 | - |

* Incluem vidro, metais e plásticos, cujas partículas apresentem uma granulometria superior a 2 mm.

O grau de maturação da matéria fertilizante é constituído por três categorias, cada uma delas associada a uma gama de temperaturas, como se pode verificar na Tabela 9.

Tabela 9 - Categorias de matéria fertilizante em função do grau de maturação. (Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ANEXO II)

| Temperaturas atingidas no teste de auto-aquecimento em vasos de Dewar (T°C) | Grau de Maturação | Categoria da matéria fertilizante |
|---|-------------------|-----------------------------------|
| T < 40 | IV e V | Maturada |
| 40 < T < 50 | III | Semimaturada |
| T > 50 | I e II | Fresca |

Relativamente a aplicação do corretivo orgânico no solo, o Decreto-lei nº 103/2015, de 15 de junho, enuncia “as quantidades a aplicar estão dependentes não só das características do solo mas também da matéria fertilizante, devendo obedecer à legislação em vigor no que respeita aos limites de aplicação de nutrientes, em particular do azoto. Os solos que receberem matérias fertilizantes devem ser sempre analisados antes da sua aplicação”.

De modo a cumprir os valores limites do composto, as análises a efetuar às matérias fertilizantes do Grupo 5 devem completar os seguintes parâmetros:

- Agronómicos: humidade, matéria orgânica, carbono total, massa volúmica aparente, pH, condutividade elétrica, azoto total, fósforo total, potássio total, cálcio total, magnésio total, boro total, razão carbono total/azoto total;
- Metais pesados: cádmio, crómio, cobre, níquel, chumbo, mercúrio e zinco total;
- Microbiológicos: Salmonella spp., Escherichia coli;
- Grau de maturação (teste de auto-aquecimento) e Fitotoxicidade;
- Materiais inertes antropogénicos e pedras;
- Sementes e propágulos de infestantes.

4.8. Metodologia de análise ao composto e à mistura inicial

O processo de obtenção do composto em estudo neste relatório realizou-se antes do início ano letivo pelo que foi impossível a sua monitorização. É importante referir que o processo em questão nem sempre ocorreu em conformidade com o Sistema Reator Horizontal (*Horizontal In-Vessel System*) em virtude de, no período que medeia 28/09/15 a 27/11/15, parte do equipamento (a máquina reviradora) não se encontrar operacional pelo que a matéria proveniente da prensagem foi descarregada diretamente na zona de armazenagem onde foi disposta segundo a semana de extração. Assim, em alternativa, o o processo de compostagem foi assegurado com a adição de um agente estruturante (estilha), com a utilização de uma pá carregadora. Durante o período de degradação da MO a temperatura do interior das pilhas e a humidade da mistura foram medidas diariamente.

Após o término deste processo de compostagem, no final de março de 2016, o composto foi todo misturado e conduzido para os corredores de compostagem para ser submetido a arejamento de forma passiva e forçada. Esta etapa do processo, realizada no período que medeia 29/03/16 a 23/09/16, serviu: para testar a eficiência da máquina reviradora nas tarefas de revolvimento das pilhas e no carregamento do composto para o transportador de tela, que se encontra no final dos túneis; e para realizar medições regulares da temperatura e do TH. O composto sobre o transportador de tela seguiu para a unidade de afinação onde se procedeu: à separação do material refinado dos refugos de afinação; e ao armazenamento do material refinado.

No início do estágio, em março/abril de 2017, era espectável a produção de composto suficiente para análise do seu processo de obtenção no percurso que vai da alimentação ao digestor anaeróbio, situação que não se verificou por motivos técnicos tendo-se assim alargado o prazo de produção de composto por tempo indefenido. Em alternativa, iniciou-se a recolha de amostras de MO, introduzida na CVO entre 17 a 27 de fevereiro, com calibre superior a 20 mm tendo-se realizado apenas as análises ao composto obtido em 2016 e as amostras de MO à entrada do digestor.

Foram tidas em consideração, incluídas e estudadas neste relatório algumas análises ao composto (teste de auto-aquecimento, análise da evolução da temperatura e humidade no interior das pilhas), as quais, apesar de terem sido realizadas antes do início do estágio, são relevantes para a avaliação do composto. Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada às várias fases deste trabalho.

a) Caracterização da fração orgânica resultante da UTM

Uma das análises físico-químicas, fundamentais para o estudo, é a caracterização física da amostra à entrada do digestor, pois permite determinar a composição da matéria que entrou no tratamento biológico após o tratamento mecânico e definir a constituição da amostra e, por conseguinte, inferir sobre a origem do composto final.

Após a colheita de 4 m de amostra sólida do tapete transportador, que leva a MO para a entrada da CVO, retirou-se uma porção da amostra total recolhida para determinar o teor de humidade, matéria seca, cinzas e matéria orgânica. Pesou-se a restante amostra e registou-se a massa exata (M_{total}), seguida de uma crivagem com dois crivos de 50 e 20 mm. Pesou-se a fracção maior que 50 e 20 mm e registou-se a sua massa ($M_{fracção}$). Para a Fração $x > 20$ mm fez-se o mesmo procedimento e procedeu-se à separação dos constituintes da amostra nas fracções referidas na Tabela 10.

Tabela 10 - Frações da caracterização e respetivos constituintes.

| Fração | Componentes |
|----------|--|
| MO | Carne, peixe, fruta, vegetais, restos de jardim, papel e cartão |
| Madeira | Madeira, rolhas, castanhas, casca de árvore, casca de amendoim e nozes |
| Osso | Ossos e espinhas |
| Vidro | Vidro |
| Pedra | Pedra, porcelana e tijolo |
| Têxtil | Têxtil |
| Plástico | Plásticos, tetrapack e pensos higiénicos |
| Metal | Metais ferrosos e não ferrosos |
| Conchas | Conchas |

Pesaram-se cada uma das fracções, registaram-se as massas (M_{Fi}) e calculou-se a percentagem correspondente de cada uma das fracções, segundo a Equação 1. Os resultados foram expressos em %.

Equação 1 – Percentagem de cada fracção do resíduo triado

$$\% \text{ Fração}(Fi) = \frac{M_{Fi}}{M_{total}} \times 100$$

b) Teor de humidade e de matéria seca

O Decreto-lei nº103/2015, de 15 de junho determina que o estudo do teor de humidade e de matéria seca cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13040:2007 - *Soil improvers and growing media. Sample preparation for chemical and physical tests*,

determination of dry matter content, moisture content and laboratory compacted bulk density. Este método é aplicado ao estudo do composto e da mistura inicial.

A análise começou por pesar 3 cadinhos vazios (m_T); depois enchê-los com aproximadamente 25 g de uma amostra húmida de resíduo devidamente homogeneizada; pesaram-se os cadinhos incluindo a amostra húmida (m_W) sendo depois colocados numa estufa ventilada previamente aquecida à temperatura de 103 ± 2 °C. Em intervalos de 45 minutos, os cadinhos da estufa foram sendo retirados para um exsicador, onde arrefeceram para serem pesados de seguida numa balança analítica. Todo este processo foi sendo repetido até garantir uma diferença entre duas pesagens sucessivas, inferior a 0,1 g, registando-se de seguida a massa dos cadinhos com a amostra seca (m_D). A partir deste procedimento foi possível efetuar os seguintes cálculos:

Equação 2 – Teor de matéria seca na amostra (%)

$$D_M = \frac{(m_D - m_T)}{(m_W - m_T)} \times 100$$

Equação 3 – Teor de humidade na amostra (%)

$$W_M = \frac{(m_W - m_D)}{(m_W - m_T)} \times 100$$

c) Teor de cinzas e sólidos voláteis

O Decreto-lei nº103/2015, de 15 de junho determina que a análise do teor de cinzas e sólidos voláteis numa amostra de resíduo húmido cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13039:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of organic matter content and ash.* Este método foi aplicado para estudo do composto e da mistura inicial.

Após a determinação do teor de humidade e matéria seca, os 3 cadinhos foram colocados numa mufla fria na qual, ao longo de 1 hora, a temperatura foi aumentada até 450 ± 25 °C permanecendo depois estável durante 6 horas. Ao fim desse tempo, retiraram-se os cadinhos para um exsicador para arrefecerem sendo depois pesadas. Este processo de aquecimento e arrefecimento manteve-se até a diferença entre duas pesagens sucessivas ser inferior a 0,01 g, registando-se finalmente a massa dos cadinhos com resíduo incinerado (m_{RI}).

Equação 4 – Teor de sólidos voláteis na amostra (%)

$$W_{om} = \frac{(m_D - m_{RI})}{(m_D - m_T)} \times 100$$

Equação 5 – Teor de cinzas na amostra (%)

$$W_{ash} = \frac{(m_{RI} - m_T)}{(m_D - m_T)} \times 100$$

d) Teor de materiais inertes antropogénicos e pedras no composto

O D.L. nº103/2015, de 15 de junho, aconselha a metodologia descrita no livro “*Methods Book for the Analysis of Compost*” (2002) Federal Compost Quality Assurance Organisation.

De acordo com a referida metodologia, os procedimentos a adotar nesta análise a aconselham a utilização de uma amostra seca, pelo que foi introduzida uma amostra húmida numa estufa previamente aquecida à temperatura de 103 ± 2 °C, durante 24 h. Ao fim desse tempo, retirou-se a amostra para um exsicador para posteriormente ser pesada. Este processo de aquecimento e arrefecimento manteve-se até assegurar que a diferença entre duas pesagens sucessivas não exceda 0,01 g.

A amostra foi pesada (P_{tot}), seguidamente peneirada manualmente através de peneiros de 5 mm e 2 mm e rejeitando-se os materiais inertes e pedras com dimensão menor que 2 mm, por não serem necessários ao estudo, e nos materiais com dimensão superior a 5 mm foram retiradas as pedras para serem pesadas ($M_{St>5mm}$). De seguida, juntou-se o material crivado de 2 a 5 mm e com dimensão superior a 5 mm e separou-se o material inerte antropogénico superior a 2 mm para ser pesado ($M_{Fs>2mm}$).

Equação 6 - Teor de material inerte antropogénico na amostra (%)

$$FS = \frac{M_{Fs>2mm}}{P_{tot}}$$

Equação 7 – Teor de pedras na amostra (%)

$$St = \frac{M_{St>5mm}}{P_{tot}}$$

e) pH

O D.L. nº103/2015, de 15 de junho, determina que a análise do pH de uma amostra cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13037:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of pH*. Este método foi aplicado para estudo do composto e da mistura inicial.

Para proceder a este estudo, o primeiro passo foi colocar as amostras de mistura inicial num moinho de martelos para obter material com dimensões menores que 1 mm e em relação ao composto foi apenas necessário crivá-lo com um peneiro com malha de 1 mm.

Posteriormente, transferiu-se para um recipiente, amostras com um peso equivalente a 60 ml do volume, onde se misturou 300 ml de água destilada, obtendo-se uma mistura que foi colocada numa máquina de agitação onde ficou a agitar durante 1 h. Por fim, com o auxílio de um medidor de pH procedeu-se à leitura deste parâmetro, anotando-se os valores apenas quando a leitura não excedeu 0,1 de uma unidade de pH durante 15 s.

f) Condutividade elétrica

O D.L. nº103/2015, de 15 de junho, determina que a análise da condutividade elétrica de uma amostra cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13038:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of electrical conductivity*. Este método foi aplicado para estudar o composto.

A determinação da condutividade elétrica foi efetuada utilizando um peso equivalente a 60 ml do volume da amostra do composto para um recipiente, de seguida adicionando 300 ml de água destilada e depois transferindo-se a mistura obtida para uma máquina de agitação onde permaneceu durante 1 h e com a temperatura de 22 ± 3 °C. Após este período de tempo, filtrou-se a mistura com um papel de filtro e mediu-se a condutividade elétrica no sobrenadante extraído em mS/cm, convertendo para dS/m.

g) Azoto de Kjeldahl

O D.L. nº103/2015, de 15 de junho, determina que a análise do Azoto de Kjeldahl de uma amostra cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13654-1: 2001 - *Soil improvers and growing media – Determination of nitrogen- Part 1: Modified Kjeldahl method*. Este método foi aplicado para estudo do composto e da mistura inicial.

Colocaram-se as amostras, com cerca de 0,5 g (bs), a digerir por aquecimento a 420 °C após a adição de um catalisador e ácido sulfúrico concentrado, o que levou à conversão de todo o azoto orgânico em NH_4^+ . A solução digerida foi posteriormente destilada, recuperando o azoto na forma de NH_3 numa solução de ácido bórico, a partir da qual se determina a quantidade de NH_3 presente por titulação, com H_2SO_4 padronizado.

O teor de azoto foi expresso em % de m.s. e foi obtido pela seguinte equação:

Equação 8 – Teor de azoto total na amostra (%)

$$\%N = \frac{M_N \times (V_{amostra}(L) - V_{branco}(L)) \times C_{H_2SO_4}(N)}{m_{amostra}(g)} \times 100$$

sendo:

M_N – massa molar do azoto (g)

$V_{amostra}$ – volume de H_2SO_4 gasto na titulação da amostra (L)

V_{branco} – volume de H_2SO_4 gasto na titulação do branco (L)

$C_{H_2SO_4}$ – concentração do titulante em equivalentes de ácido por litro (N)

$M_{amostra}$ – massa de amostra seca (g)

h) Extração de elementos solúveis em água-régia

O D.L. nº103/2015, de 15 de junho, determina que a extração e análise de elementos solúveis em água-régia cumpra com o estabelecido pela norma europeia EN 13650:2001 - *Soil improvers and growing media. Extraction of aqua regia soluble elements*. Este método foi aplicado ao estudo do composto e da mistura inicial.

A determinação da quantidade de elementos (potássio, cobre, zinco, crómio, cádmio, níquel, chumbo, sódio, manganês e ferro) numa amostra sólida pressupõe a sua prévia solubilização e seguindo-se o processo de extração com água-régia, sendo este um processo de digestão ácida da amostra sólida (0,5 g) numa mistura de ácido nítrico e ácido clorídrico (água-régia) durante 16 horas, a fim de permitir a oxidação lenta da matéria orgânica presente na amostra. Ao fim deste período de tempo, coloca-se o recipiente de reação num aparelho de aquecimento frio, algumas bolinhas de vidro rugosas no seu interior e em seguida regulou-se a temperatura da mistura de reação até se atingir as condições de refluxo. A duração desta atividade é de cerca de 2 horas, após o que se transfere o conteúdo do recipiente de reação para um balão volumétrico de 100 ml onde se diluiu com água destilada até à marca. A solução obtida pode posteriormente ser analisada por espectrofotometria.

i) Carbono Orgânico Total

O carbono orgânico total foi estimado a partir do teor de sólidos voláteis do composto e da mistura inicial, dividindo-o por um fator de 1,8 (Haug, 1993).

j) Teste de fitotoxicidade - germinação em caixa de Petri

No sentido de avaliar a fitotoxicidade do composto, realizou-se um teste de germinação utilizando como semente o agrião de jardim. A fim de permitir a germinação das sementes, foram preparadas nove caixas de Petri, previamente revestidas com papel de filtro, sendo: três com extrato aquoso com 25% de composto; outras três com extrato aquoso com 50% de composto; e as restantes três com branco (água destilada). Em cada caixa foram

colocadas 40 sementes juntamente com 5 ml de cada uma das concentrações de extrato e do branco. As caixas de Petri foram por fim colocadas numa estufa de incubação durante 24 horas e a temperatura de 28°C e por fim contabilizou-se as sementes germinadas no branco (n_2) e nas amostras (n_1).

Equação 9 – Índice de germinação (IG)

$$IG (\%) = \frac{n_1}{n_2} \times 100$$

Um composto é considerado não fitotóxico se apresentar um IG (índice de germinação) superior a 60%, para a diluição a 25% (Zucconi et al, 1981).

k) Teste de fitotoxicidade - crescimento em vaso

O teste de crescimento em vaso aplicado ao composto, deve ser iniciado com a mistura do material das amostras com turfa, tendo em vista a sua homogeneização, em proporções de 25:75 e 50:50 (v/v) e de acordo com o procedimento laboratorial seguido.

O teste consistiu na disseminação de uma massa igual de sementes (cerca 3 g) de *Lolium perenne* (azevém), em vasos de 0,5 L, numa mistura homogênea num meio de cultura, rico em nutrientes (turfa) e composto. Neste teste foram realizadas três réplicas de cada mistura composto/turfa e branco, nos quais foi utilizada apenas turfa.

O teste teve a duração de 15 dias, em condições de luz e humidade favoráveis, ao fim dos quais a biomassa verde foi cortada e seca em estufa a temperatura de 105°C durante 24h. As pesagens da biomassa seca na amostra (m_{bi}) e no branco (m_{bb}) permitiram determinar o índice de crescimento (IC).

Equação 10 – Índice de crescimento (%)

$$IC (\%) = \frac{m_{bi}}{m_{bb}} \times 100$$

A interpretação dos resultados é efetuada com base na Tabela 11, que consta na Proposta de Regulamentação para a Qualidade do Composto para utilização na Agricultura.

Tabela 11 - Interpretação dos resultados da produção relativa, em ensaios de vaso

| Situação | IC | | Interpetação |
|----------|---------------------|---------------------|---|
| | 25 % (v/v) composto | 50 % (v/v) composto | |
| A | > 0.90 | > 0.90 | O composto apresenta ótima qualidade e pode ser usado como substrato de suporte de culturas |
| B | > 0.90 | ≤ 0.90 | O composto está suficientemente maturado para ser usado como corretivo orgânico do solo, mas não pode ser usado como constituinte de suportes de culturas |
| C | ≤ 0.90 | ≤ 0.90 | O composto não apresenta qualidade para ser usado como corretivo orgânico e a sua utilização é restrita |

l) Taxa de respiração do composto (teste respirométrico)

Este teste baseia-se no uso de medidores oxitop, um sistema de medição do consumo de oxigénio através do registo e armazenamento dos valores de pressão negativa que se gera no “*headspace*” de frascos fechados contendo uma amostra homogeneizada. O princípio do método baseia-se na carência bioquímica de oxigénio (CBO₅) que resulta da quantidade de oxigénio consumida durante a oxidação biológica aeróbia da matéria orgânica ou inorgânica contida na amostra durante um período de 5 dias em condições de humidade a 50% e temperatura de 20°C bem definidas e num ambiente escuro.

O CO₂ libertado é absorvido em pellets de NaOH que se colocam na parte interior da tampa dos frascos. Na Fig.24 é possível ver os medidores oxitop usados neste teste, após o período de 5 dias.

Equação 11 – Taxa de respiração do sólido

$$BA = \frac{M(O_2)}{R \times T} \times \frac{V_{fr}}{m_{Bt}} \times \Delta p$$

Legenda:

BA = Taxa de respiração do sólido (in mg O₂ / g ST)

M (O₂) = massa molar do O₂: 32000 mg/mol

V_{fr} = volume de ar: 1,473 L

R = constante de gases perfeitos: 83,14 L mbar mol⁻¹ K⁻¹

T = temperatura medida: 293,16 K

m_{Bt} = massa de matéria seca do solo na preparação de medição (g)

Δp = redução da pressão verificada ao longo da medição (mbar)



Figura.24 – Medidores oxitop usados no teste respirométrica (Foto – José Pereira)

m) Teste de auto-aquecimento: Teste de *Dewar*

A realização do teste de auto-aquecimento requer dois procedimentos prévios: peneirar a amostra de composto afinado através de um peneiro com crivo de malha de 10 mm; e corrigir o seu TH para 35%. De seguida introduziu-se 1500 g de composto num recipiente adiabático (*Dewar flask*) mantido à temperatura ambiente. O ensaio terminou quando a temperatura máxima foi atingida anotando-se o seu valor em graus Celsius, começando de seguida a decrescer e acabando por estabilizar. Verificou-se de seguida o grau de maturação de acordo com a temperatura máxima atingida, durante o ensaio de auto-aquecimento e de acordo com a classificação do “*Methods Book for the Analysis of Compost*” (2003), como demonstra a Tabela 12. Este estudo foi realizado em dois períodos diferentes: de 24/05/16 a 03/06/16, e 06/06/2016 a 16/06/16.

Tabela 12 - Grau de maturação do composto de acordo com a temperatura máxima atingida durante o ensaio de auto-aquecimento. (Fonte: *Methods Book for the Analysis of Compost*, 2003)

| Designação | Temperatura máxima (°C) | Classe de estabilidade |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Material inicial | > 60°C | I |
| Composto fresco | 50°C - 60°C | II |
| Composto fresco | 40°C - 50°C | III |
| Composto maturado | 30°C - 40°C | IV |
| Composto maturado | <30°C | V |

n) Medição da temperatura

O comportamento da temperatura no interior das pilhas de compostagem foi monitorizado com recurso a uma sonda com comprimento de 1,5 m e enterrada nas pilhas (até à profundidade de 0,83 m). As análises foram feitas diariamente em cinco pontos diferentes das pilhas.

o) Análise granulométrica ao composto

A granulometria do composto foi determinada com base no procedimento para corretivos orgânicos descrito no D.L. nº103/2015, de 17 de junho, começando por pesar cerca de 1kg de composto afinado, e peneirar essa amostra com três crivos de 20, 10 e 5 mm de abertura de malha. Assim, foi possível obter três frações das quais se anotou o peso de cada uma sendo o resultado final expresso em percentagem.

4.9. Apresentação de resultados

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises efetuadas aos materiais utilizados na preparação dos substratos, à evolução da temperatura e humidade no interior das pilhas, e uma avaliação realizada ao produto final.

4.9.1. Mistura inicial segregada pela UTM

a) Caracterização física

A caracterização diária à entrada da CVO, permitiu conhecer a matéria-prima utilizada no processo de valorização orgânica tal como se apresenta nas Fig.s 25 e 26. Da análise das figuras verifica-se que a MO e os resíduos finos ocupam grande parte do volume das amostras e os outros materiais correspondem a valores bem mais reduzidos, embora o vidro se destaque entre eles e apresente uma presença significativa. No entanto, o teor de inertes (vidro, pedras, metal e conchas) representa, em média, 4,5% de toda a massa de resíduos triados, revelando ser uma percentagem baixa, fruto de um bom desempenho da UTM na triagem de resíduos.

Tendo em conta uma distribuição normal, nesta análise foram determinados os intervalos de confiança de 95% para todas as frações de resíduo (ver Anexo I para ver a metodologia da determinação de intervalos de confiança). É possível verificar que é nos dias 17/02 e 27/02 que ocorrem mais valores que não se encontram dentro do intervalo de confiança. O dia 22/02 é o único que não apresenta valores fora do intervalo. É de realçar que frações como a madeira, ossos, conchas e filmes plástico não apresentam nos respetivos gráficos um comportamento padrão, ou seja, apresentam valores de percentagem muito diferentes ao longo do período de amostragem.

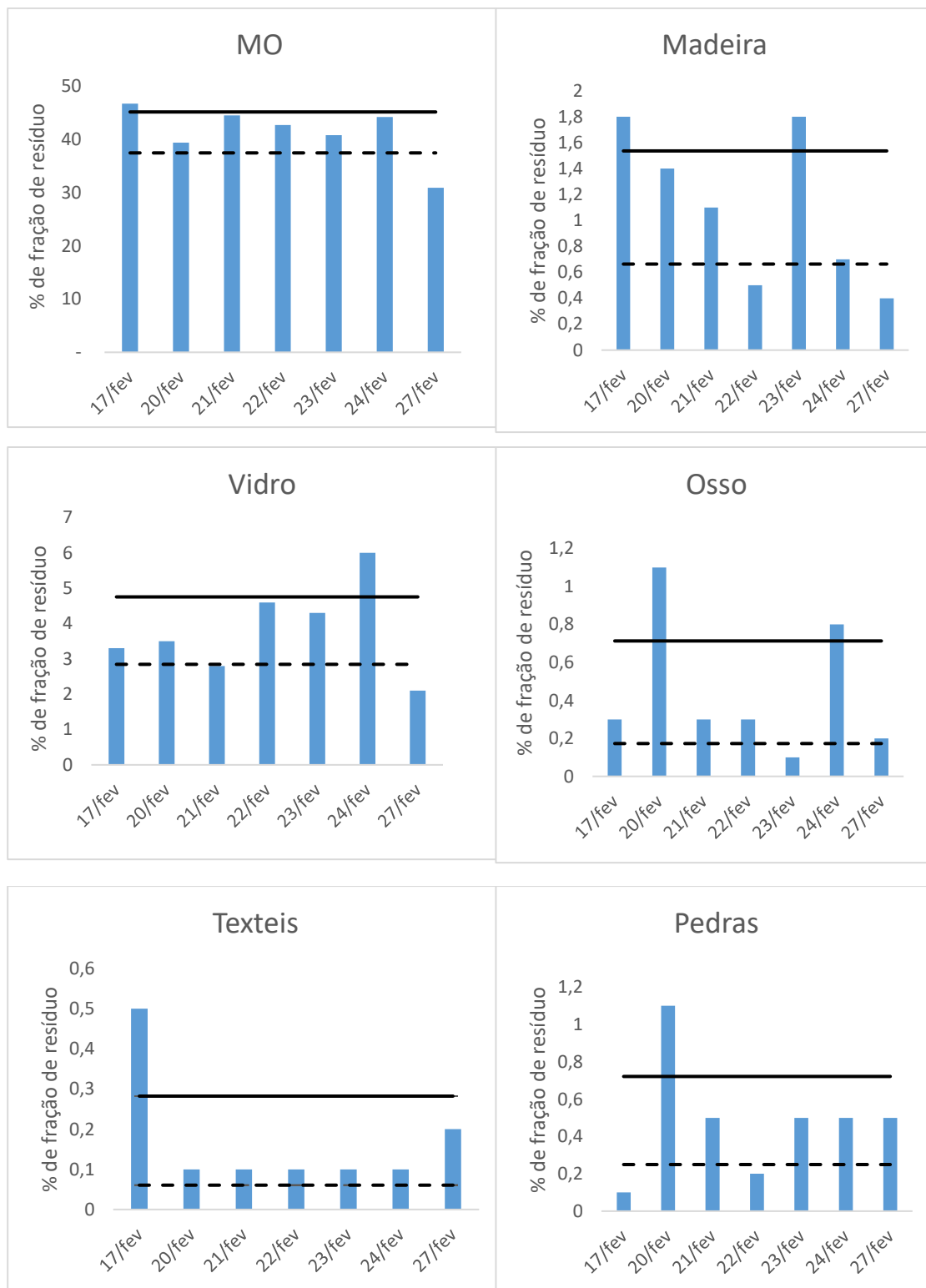


Figura 25 – Caracterização física da mistura inicial, com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontinuo – limite inferior)

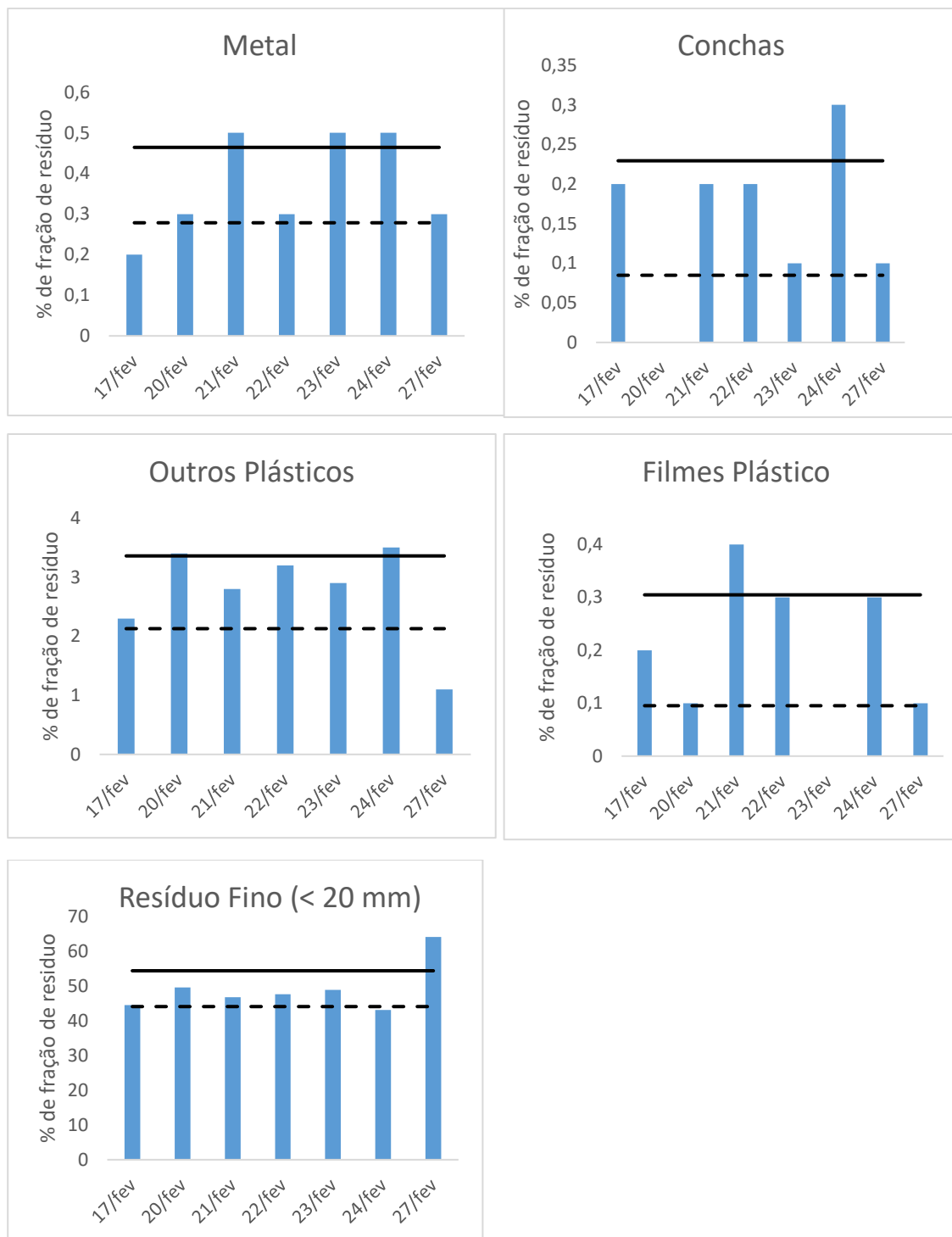


Figura 26 - Caracterização física da mistura inicial com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontinuo – limite inferior)

b) Caracterização química

Os resultados da caracterização química expostos na Tabela 13, permitem verificar que a constituição da mistura inicial revelou um teor de humidade de 56,07%, valor considerado ótimo para empreender um processo de degradação da MO com elevada eficiência e

defendido pela bibliografia consultada (50-60%). Tal sucesso deve-se ao fato da água não preencher os espaços vazios da mistura, possibilitando a circulação de oxigénio. Verificou-se também que, em média, a mistura inicial era constituída por 54,84% de sólidos voláteis, por 45,16% de cinzas e 43,93% de matéria seca e em relação à razão C/N constatou-se que esta se encontra dentro da gama de valores defendida na bibliografia.

Tabela 13 - Valores médios apurados nas análises realizadas para caracterização da MO

| Amostra | Parâmetro | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------|
| | pH | Humidade [% m/m, btq] | Matéria seca [%, bs] | Sólidos Voláteis [%, bs] | Cinzas [%, bs] | Azoto de Kj [% m/m, bs] | Carbono orgânico total [% m/m, bs] | Razão ponderal C/N |
| MO | 6,23 | 56,07 | 43,93 | 54,84 | 45,16 | 1,36 | 30,46 | 22,60 |

As Figuras 27 e 28 indicam os valores de concentração (mg/kg) dos elementos na MO (ver Anexo H para consultar as curvas de calibração para cada elemento). Para efeitos de comparação, as figuras também demonstram a concentração no composto. Os resultados obtidos não permitem uma análise eficaz por comparação às normas analíticas, referências protocolares ou documentos legais indicadores do teor máximo a encontrar na mistura inicial, pois estes valores dependem sempre do material que compõe a mistura. Além do mais não se conhece legislação que indique os valores mínimos e máximos de concentração de nutrientes numa amostra tendo sido método de extração o da água-régia. Estabelecendo intervalos de confiança de 95% com base numa distribuição normal, é possível constatar que é no dia 17/02 que ocorrem mais valores a ultrapassarem o intervalo de confiança, o que leva a concluir que a amostra encontrava-se bastante contaminada. As amostras dos dias 23/02 e 24/02 não apresentam valores fora do intervalo de confiança. Tendo como referência o D.L. nº 103/2015, de 17 de junho, é de realçar que a amostra do dia 21/02 apresenta um teor de cobre bastante elevado, ultrapassando o teor máximo admissível para um composto de classe IIA. Comparando com o composto, é de notar que a concentração do sódio e no potássio desce em relação à mistura inicial. Ainda que não seja a mistura que deu origem ao composto, é possível estabelecer comparações pois é esperado que a concentração dos nutrientes desça devido ao facto de estes serem facilmente solubilizados e permanecerem na fase líquida do material que sai do digestor (filtrado pelo sistema de desidratação). No entanto, não é o que se verifica no caso do ferro, embora este valor possa estar em concordância com a mistura que deu origem ao composto. No caso dos metais pesados, estes concentram-se no bolo desidratado, não sendo degradados na compostagem, pelo que a sua concentração irá aumentar como se

pode verificar em todos os metais analisados. É importante referir que também se avaliou o teor de cádmio mas não se detetou por espectrofotometria de absorção atômica, vestígios deste metal nas amostras. Em comparação com os valores estabelecidos pelo D.L. nº 103/2015, de 17 de junho, as concentrações dos metais não são superiores aos valores máximos admissíveis para um composto de Classe IIA.

Relativamente ao teor de azoto de Kjeldahl nas amostras e no composto, é possível assumir que os teores de azoto da mistura inicial encontram-se dentro da gama que conferirá uma razão C/N adequada (30, Haug, 1983), mas o composto revela um teor um pouco mais baixo, o que seria de esperar uma vez que ocorre a volatilização de algum azoto amoniacal durante a degradação da matéria orgânica no processo de compostagem.

Embora todos os outros parâmetros referidos anteriormente possam não proporcionar informações relevantes para a previsão da eficácia do andamento do processo de compostagem, podem, contudo, ser decisivas para fundamentar a avaliação final do produto obtido.

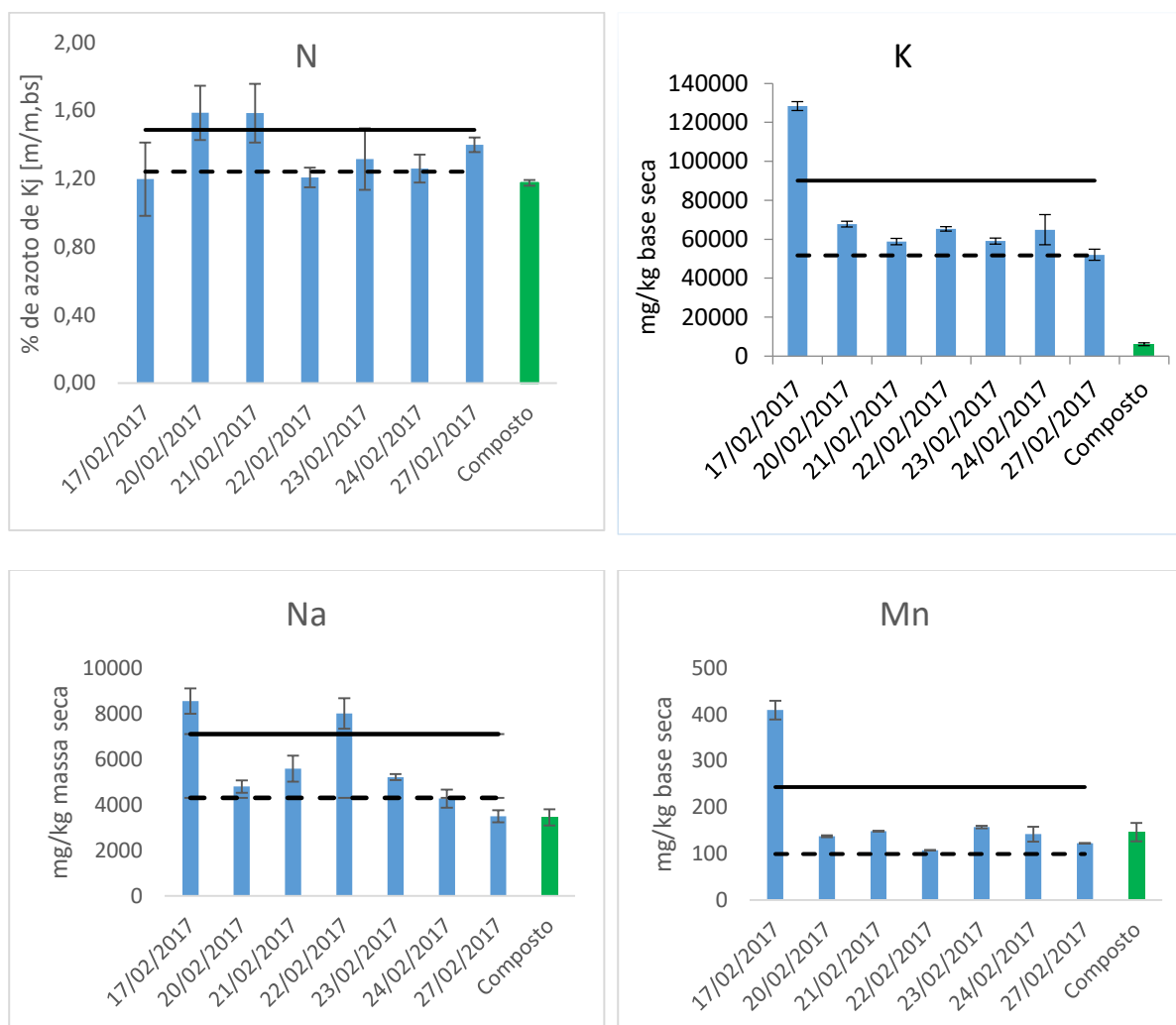


Figura 27 – Teores (%) de Azoto de Kjeldahl, Potássio, Sódio e Manganês (%) com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontinuo – limite inferior)

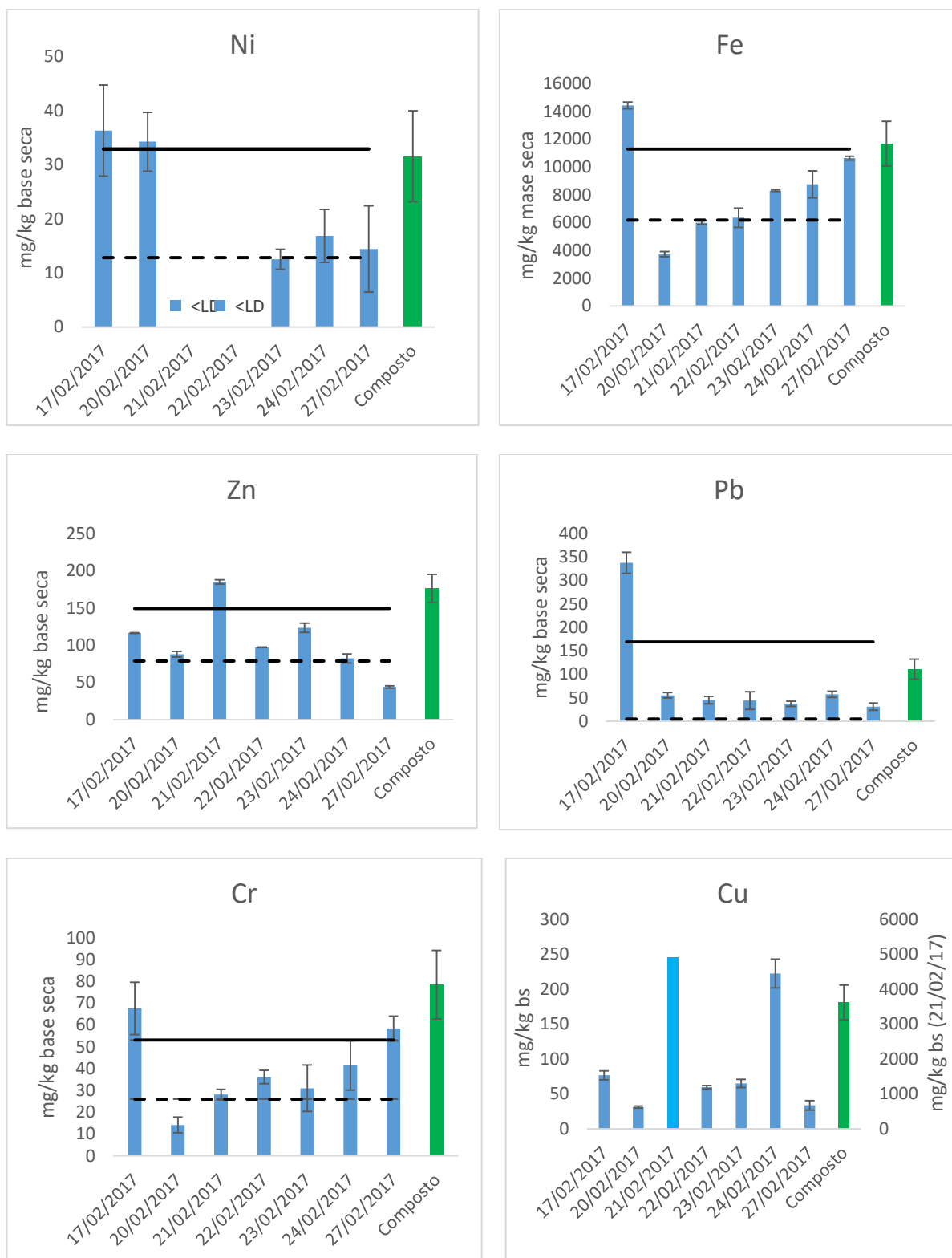


Figura 28 – Concentração (mg/kg, bs) de metais pesados (Níquel, Ferro, Zinco, Chumbo, Crômio e Cobre) na mistura inicial e no composto com intervalos de confiança de 95 % (traço contínuo- limite superior; traço descontinuo – limite inferior)

No caso do cobre, não foi possível estabelecer um intervalo de confiança devido à diferença de concentrações entre a amostra do dia 21/02 e as restantes.

4.9.2. Evolução do processo de compostagem

As Figuras 29 e 30 mostram a variação da temperatura e do teor de humidade no interior das pilhas ao longo do processo de compostagem.

O material a compostar foi depositado na zona de armazenamento, onde foi misturado com estilha e revolvido por uma pá carregadora e regado sempre que a temperatura da pilha ultrapassava os 60 °C por forma a garantir uma temperatura entre os 50 e 60°C, idealmente atingindo os 55°C. Enquanto as temperaturas se mantiveram na gama dos 50-60°C, não ocorreu nenhum revolvimento das pilhas e em caso contrário, quando se ultrapassou os 70°C, o revolvimento começou a ser feito periodicamente, chegando a ser feito todos os dias quando a temperatura atingiu o seu pico máximo. Saliente-se que em caso dos valores de temperatura ultrapassarem os estipulados: a maioria dos microrganismos não sobrevive ocorrendo diminuição de diversidade microbiológica (a maioria dos microrganismos não sobrevive a temperaturas superiores a 70°C); e pode ocorrer a formação de esporos. O arejamento forçado do material, juntamente com a diminuição da atividade microbilógica e o fornecimento de água por rega, terá promovido a descida de temperatura. Quando não existe grande disponibilidade de matéria orgânica facilmente degradável a temperatura diminui, entrando na fase de arrefecimento até estabilizar por volta dos 40°C.

Em todos os gráficos é possível constatar que nas primeiras semanas acontece um aumento exponencial da temperatura, fruto da grande intensidade das reacções biológicas, o que implica uma maior degradação da matéria orgânica até se atingir o pico de temperatura. No entanto, observando as temperaturas máximas atingidas em todos os gráficos, percebe-se que foram atingidos valores que ultrapassaram a gama de valores da fase termófila, chegando mesmo a ultrapassar os 70°C (nas semanas 44, 45, 46/47 e 48) sendo de realçar que estas temperaturas mantiveram-se por mais de uma semana. Como foi referido anteriormente, nestas condições ocorre formação de esporos e a maioria dos microrganismos não sobrevive a estas temperaturas, podendo este fato ter sido responsável pelo prolongamento do processo. Com o tempo, as temperaturas das pilhas foram diminuindo, sinal que a fase termófila ia dando lugar à fase de maturação.

Quanto ao teor de humidade:

- Os gráficos demonstram que a evolução do TH não segue um padrão fixo, tendo muitos altos e baixos que podem ter origem nas condições climáticas envolventes uma vez

que no final de cada extração, o material prensado era transportado por uma pá carregadora para a zona de armazenamento, estando exposto ao ar livre durante o transporte;

- Ao longo do processo de compostagem, em todas as pilhas, o TH encontra-se abaixo dos 50% provocando o abrandamento da atividade microbiana e retardando o processo de compostagem;
- O TH inicial não é uniforme em todas as pilhas, podendo-se também atribuir a explicação às condições climáticas.



Figura 29 – Evolução da temperatura (laranja) e da humidade (azul) no interior das pilhas de compostagem, na zona de armazenamento (pilhas 40/41, 42, 43, 44, 45 e 46/47)

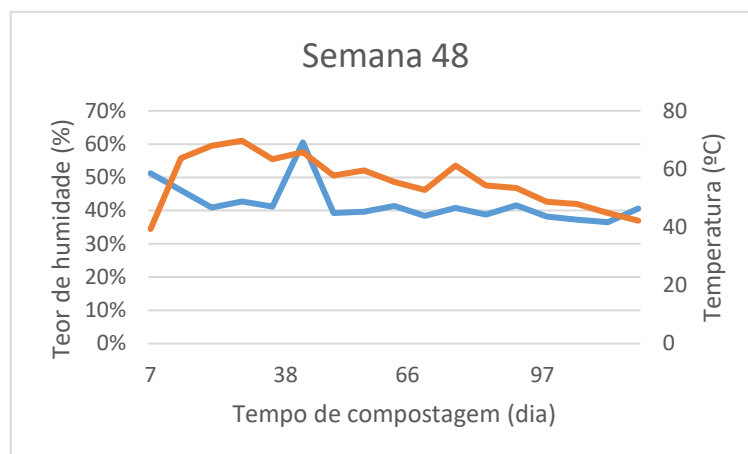


Figura 30 - Evolução da temperatura (laranja) e da humidade (azul) no interior na pilha de compostagem 48, na zona de armazenamento

4.9.3. Composto

A qualidade do composto é definida segundo o cumprimento de especificações padronizadas de métodos analíticos e agrónomicos que definem a qualidade do produto final da compostagem. Em Portugal foi publicado recentemente, em diário da república, o D.L. n.º 103/2015, de 15 de junho, relativo aos valores limites para colocação no mercado das matérias fertilizantes. Assim sendo, a avaliação da qualidade do composto foi feita através da comparação dos resultados obtidos em laboratório com os valores estabelecidos no referido Decreto-Lei. Para uma avaliação mais pormenorizada, também se comparou com os valores estabelecidos na *2nd Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document* (DG Env. A.2., 2001) e com a Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto (2005).

Após o longo período de armazenagem do composto na unidade de afinação, este apresentava uma cor castanho-escuro e um forte odor de terra húmida durante a fase de amostragem, sinónimo que se procedeu a um processo de compostagem eficaz.

Analisando a Tabela 14, é possível de verificar que o valor médio de pH encontra-se na gama de valores estabelecidos pelo D.L. nº 103/2015, de 15 de junho. Este valor é altamente influenciado pelas características dos materiais que lhe deram origem e ao processo de compostagem, mas como não foi possível acompanhar o processo, torna-se impossível explicar que materiais e variáveis poderão ter condicionado este valor.

A razão C/N encontra-se na gama de valores 12-20, gama essa defendida pela bibliografia consultada como sendo ideal para encontrar num composto. O valor obtido indica um bom grau de composição dos materiais orgânicos. No entanto, esta relação não pode ser

considerada como um indicador absoluto do estado de estabilização de um composto, uma vez que depende bastante das características químicas dos materiais que lhe deram origem.

O teor de MO do composto, reportado ao peso seco, tem um valor superior a 30%, estando de acordo com os requisitos do Decreto-Lei. O TH também está dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Decreto-Lei.

Segundo a Tabela 15, a percentagem de pedras superiores a 5 mm no composto encontra-se abaixo do valor máximo admissível pelo Decreto-Lei. No entanto, a percentagem de inertes antropogénicos é muito superior ao valor máximo sugerido no mesmo documento.

No que se refere aos teores de Azoto total, Carbono Orgânico Total, Potássio, Manganês e Sódio total, nem o *2nd Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document (DG Env. A.2., 2001)*, o D.L. nº103/2015, de 17 de junho, ou a Proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do Composto (2005) contemplam valores indicativos para estes parâmetros.

Em relação ao teor em metais pesados, apresentados nas Figuras 29 e 30, para efeitos de comparação (antes e depois), o composto não apresenta quantidades que ultrapassem os valores máximos recomendados pelo Decreto-Lei, sendo possível verificar que o teor em cádmio é praticamente nulo.

Na Tabela 19 encontram-se os valores das temperaturas máximas atingidas no teste de Dewar. Comparando estes valores com a Tabela 9, é possível afirmar que estes correspondem a um grau de maturação de nível V. Ou seja, o composto encontra-se maturado.

No estudo da granulometria do composto, não foi possível usar um peneiro com uma abertura de malha de 25 mm, tal como o D.L. sugeria. No entanto, nos resultados obtidos (ver Tabela 20) verificou-se que a percentagem de material a ficar retido no peneiro com uma abertura de malha de 20 mm foi de 0%. Por outras palavras, a percentagem de material retido numa malha de 25 mm também seria nula. Este resultado vem de encontro ao valor recomendado pelo Decreto-Lei.

Neste estudo procedeu-se a dois testes de fitotoxicidade com propósitos diferentes. O teste de germinação procurou analisar os possíveis efeitos nefastos do composto sobre a etapa de germinação enquanto o teste de crescimento procurou revelar possíveis efeitos sobre as várias etapas de desenvolvimento. Os resultados expressos nas Tabelas 17 e 18 indicam que a aplicação do composto nas percentagens 25% e 50% revelam uma fitotoxicidade bastante reduzida. Verificou-se no teste de germinação que o IC é ligeiramente

superior quando o composto é aplicado em menor quantidade mas é possível concluir que o produto final obtido não apresenta níveis significativos de fitotoxicidade. A Tabela 18 evidencia diferenças significativas da aplicação de diferentes doses de composto. As amostras correspondentes a brancos apresentam uma massa superior à das outras amostras, denunciando um maior crescimento. A aplicação do composto em doses diferentes revela ainda uma influência nítida no tempo necessário para surgimento dos primeiros rebentos, o que leva a constatar que os fatores inibidores poderão ter um efeito notório na fase de germinação e fase inicial de crescimento do azevém.

Mendes (2011) referiu que o valor máximo de condutividade eléctrica num composto para aplicação no solo será de 3 dS.m⁻¹. Analisando a Tabela 22, é possível afirmar que o composto não apresenta valores que ultrapassem esse valor, estando apto para ser aplicado no solo sem provocar problemas de fitotoxicidade ou inibição de atividade biológica, relativamente a este parâmetro.

Segundo o *2nd Draft of Biological Treatment of Biowaste – Working Document (DG Env. A.2., 2001)*, o valor obtido para um teste respirométrico deve ser inferior a 10 mg O₂.g⁻¹ de matéria seca da amostra para que seja considerado um resíduo não biodegradável e esteja estabilizado de acordo com a definição apresentada no Artigo 2 da Directiva 1999/31/EC - “*Resíduos Biodegradáveis: os resíduos que podem ser sujeitos a decomposição anaeróbia ou aeróbia, como, por exemplo, os resíduos alimentares e de jardim, o papel e cartão*”. Como é possível de verificar na Tabela 21, do teste respirométrico efetuado ao composto obteve-se o valor de 3,911 mg O₂/g ST, para uma média de três réplicas.

Tabela 14 - Valores médios apurados nas análises realizadas para caracterização do composto

| Material | Parâmetro | | | | | | | |
|----------|-----------|-----------------------|------------------|----------------------|------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------|
| | pH | Humidade [% m/m, btq] | Matéria seca [%] | Sólidos Voláteis [%] | Cinzas [%] | Azoto de Kj [% m/m, bs] | Carbono orgânico total [% m/m, bs] | Razão ponderal C/N |
| Composto | 7,6 | 31,58 | 68,42 | 37,64 | 62,36 | 1,17 | 20,91 | 17,87 |

Tabela 15 - Valores médios apurados nas análises realizadas ao teor de inertes do composto

| Material | Parâmetro (%) | |
|----------|-------------------------------|---------------|
| | Inertes antropogénicos > 2 mm | Pedras > 5 mm |
| Composto | 13 | 1 |

| Material | Elemento (mg/kg, bs) |
|----------|----------------------|
|----------|----------------------|

| | Fe | Ni | Mn | Pb | K | Zn | Cd | Cr | Cu | Na |
|-----------------|-------|----|-----|-----|------|-----|----|----|-----|------|
| Composto | 11688 | 36 | 146 | 111 | 6078 | 176 | ND | 78 | 181 | 3446 |

Tabela 16 – Valores médios apurados para o teor de elementos no composto em mg/kg (base seca)

- ND – Não Detetado

Tabela 17 – Índice de crescimento determinado para o composto a partir de 3 réplicas para cada amostra

| Amostra | Réplicas | Massa seca (g) | Média de massa seca (g) | Desvio-padrão | Coefficiente de variação | IC (%) |
|------------------|----------|----------------|-------------------------|---------------|--------------------------|--------|
| Branco | #1 | 2,8023 | 2,8243 | 0,035 | 0,012 | - |
| | #2 | 2,8776 | | | | |
| | #3 | 2,7931 | | | | |
| 25% (v/v) | #1 | 2,4247 | 2,7196 | 0,196 | 0,072 | 96,3 |
| | #2 | 2,7341 | | | | |
| | #3 | 3,0000 | | | | |
| 50% (v/v) | #1 | 2,9572 | 2,7426 | 0,143 | 0,052 | 97,1 |
| | #2 | 2,6577 | | | | |
| | #3 | 2,6130 | | | | |

Tabela 18 – Índice de germinação determinado para o composto a partir de 3 réplicas para cada amostra

| Proporção | Réplica | nº de sementes usadas | nº sementes germinadas | IG (%) | Média (%) | Desvio-padrão (%) | Coefficiente de variação |
|------------------|---------|-----------------------|------------------------|--------|-----------|-------------------|--------------------------|
| Branco | #1 | 40 | 37 | 92,5 | 95,8 | 3 | 0,03 |
| | #2 | 40 | 39 | 97,5 | | | |
| | #3 | 40 | 39 | 97,5 | | | |
| 25% (v/v) | #1 | 40 | 38 | 99,1 | 98,3 | 2 | 0,02 |
| | #2 | 40 | 38 | 99,1 | | | |
| | #3 | 40 | 37 | 96,5 | | | |
| 50% (v/v) | #1 | 40 | 37 | 96,5 | 97,4 | 2 | 0,02 |
| | #2 | 40 | 38 | 99,1 | | | |
| | #3 | 40 | 37 | 96,5 | | | |

Tabela 19 – Valores das temperaturas máximas - Teste de Dewar

| Período de recolha de amostras | Temperatura máxima (°C) |
|--------------------------------|-------------------------|
| 24/03/16 - 03/06/16 | 23,1 |
| 06/06/16 - 16/06/16 | 24,7 |

Tabela 20 – Valores médios apurados nas análises realizadas a granulometria do composto

| Dimensões | Massa (g) | % |
|----------------|-----------|-------|
| X > 20 mm | 0 | 0,00 |
| 20 > X > 10 mm | 7,3 | 0,73 |
| 10 > X > 5 mm | 335,4 | 33,47 |
| X < 5 mm | 659,5 | 65,81 |

Tabela 21 – Valores apurados para o teste respirométrico

| Parâmetros | Réplicas | | |
|---------------------------------------|----------|-------|-------|
| | #1 | #2 | #3 |
| m _{Bt} (g ST) | 15 | 15 | 15 |
| Δp (mbar) | 30 | 31 | 30 |
| BA (mg O ₂ /g ST) | 3,868 | 3,997 | 3,868 |
| Média de BA (mg O ₂ /g ST) | 3,911 | | |

Tabela 22 - Valores apurados na análise da condutividade elétrica do composto

| Parâmetro | Réplicas | | |
|-------------------------------|----------|------|------|
| | #1 | #2 | #3 |
| Condutividade elétrica (dS/m) | 2,74 | 2,12 | 1,74 |
| Média (dS/m) | 2,20 | | |

4.10. Considerações Finais

Um dos objetivos do presente relatório foi a avaliação das propriedades físicas e químicas da mistura inicial a entrar na CVO, bem como do composto obtido pelo primeiro processo de compostagem realizado na AMRPB. Através desta análise foi possível verificar se o composto obtido tinha potencial para ser aplicado em solos. No entanto, devido ao facto do processo de compostagem se ter desenrolado antes do ano letivo começar, não foi possível acompanhar o desenvolvimento do mesmo, não se podendo concluir com precisão acerca da relevância das propriedades da mistura inicial.

a) Mistura Inicial e MO

O cálculo da razão ponderal média de C/N revelou um valor que se encontra abaixo do valor máximo recomendável pela bibliografia consultada. Se a alimentação à CVO for feita só por este tipo de material, as necessidades de N e P das bactérias metanogénicas podem ser satisfeitas, não ocorrendo inibição da atividade microbiana.

Registou-se que a composição física dos resíduos revela um teor em inertes baixo comparativamente com o teor de MO. No entanto, seria desejável levar a população a aderir mais à reciclagem, diminuindo assim o teor de inertes no resíduo (especialmente o vidro). Segundo Gonçalves (2012), a variabilidade da constituição da mistura inicial

depende maioritariamente do sistema de recolha utilizado, da sua proveniência ou efeitos de sazonalidade ao longo do ano. O teor em contaminantes (e.g. plásticos, vidros, metais pesados e algumas substâncias químicas) geralmente está presente em menores quantidades em sistemas de recolhas selectivas “porta-à-porta”, apresentando baixos teores em matéria não-biodegradável. Outro aspeto deste procedimento é a influência sobre a produção específica de biogás no digestor, bem como na sua qualidade em metano (devido a menores concentrações de substâncias tóxicas aos microrganismos, não dependendo unicamente da configuração do processo utilizado para maximização da eficiência de produção). Outra medida que poderá diminuir o teor de contaminantes será a instalação de uma cabine de triagem antes do *trommel* 1, onde se iria triar resíduos de maior volume (e.g. garrafas de vidro) e suscetíveis de conterem uma elevada concentração de substâncias químicas (e.g. resíduos com tintas e vernizes).

b) Processo de compostagem

Registou-se nos gráficos respeitantes às semanas 44, 45 e 46/47 uma grande subida de temperaturas no início do processo, cujo máximo ultrapassou os 70°C. Este pico de temperaturas durou mais de uma semana, facto que terá levado à diminuição da diversidade microbiológica. No entanto, apesar deste nível de temperaturas ser bastante prejudicial ao processo de compostagem, garante também a destruição da maioria dos seres patogénicos, das sementes de ervas daninhas e de larvas de insetos. Aliás, todos os gráficos apontam para que o material a compostar tenha sido mantido a 55°C durante um período de três dias que, segundo os requisitos da EPA, será um período suficiente útil para uma eliminação significativa dos seres patogénicos. Para evitar picos de temperatura tão elevados, sugere-se que nos primeiros dias o revolvimento seja feito diariamente, algo que não ocorreu durante o processo. Nos gráficos que representam as semanas 40/41, 42, 43, o pico máximo de temperaturas situa-se na gama de temperaturas termófilas (de 44 a 66 °C) considerada ideal pela bibliografia consultada para eliminação de seres patogénicos, sem prejudicar a população de organismos que procedem à degradação da matéria biodegradável. O gráfico respeitante à semana 48 apresenta valores de temperaturas máximas entre os 66 e os 70°C, não sendo uma situação considerada crítica para o processo.

Como referido anteriormente, a maior parte da perda de calor na compostagem ocorre pela evaporação da água, sendo que os materiais não devem ter um teor de humidade abaixo de 40%, sob o perigo de ocorrer combustão espontânea do material. Os gráficos respeitantes às semanas 45 e 48 apresentam durante maior parte do tempo do processo,

valores de TH menores que 40%. Esta situação poderia ter sido evitada com a rega das pilhas de forma mais periódica. Outra maneira de evitar o problema será misturar resíduos verdes com o material a compostar, por possuírem um TH mais elevado. Os gráficos das semanas 42 e 44 apresentam valores de TH menores que 40% em períodos de tempo superiores a 7 dias, pelo que fica a mesma sugestão. É de referenciar que o processo de rega das pilhas regeu-se apenas pelas temperaturas da pilha, não tendo em linha de conta que por várias vezes o TH foi menor que 40%.

Por fim, considerando o material que a Ferrovial Serviços dispõe nas suas instalações, pode ser efetuado um estudo da evolução da degradação da matéria orgânica ao longo do processo. Tal análise pode ser feita através da determinação do teor de sólidos voláteis em amostragens realizadas periodicamente. Outros estudos que se recomendam são o cálculo da relação C/N e o do teor de nutrientes e de metais pesados, a fim de monitorizar a qualidade do composto que se produz na CVO.

c) Composto

Análise efetuada ao composto permite afirmar que este, segundo o Decreto-Lei nº103/2015, de 17 de junho, apresenta ótima qualidade para um composto Classe II A, podendo ser usado como substrato de suporte de culturas, nomeadamente pomares, olivais e vinhas. No entanto, o teor de inertes antropogénicos é bastante elevado para que o composto seja comercializado, sendo o teor de vidros especialmente elevado. De facto, comparando o valor obtido com o teor num corretivo orgânico comercial – Siro Agro 2 (Anexo G), é possível ver que os valores diferem bastante. O valor no corretivo comercial é nulo daí que se aconselha um processo de afinação posterior à compostagem mais rigoroso. Algumas sugestões para alcançar esse objetivo são: trocar a abertura de malha do separador balístico da unidade de afinação dos 20 mm atuais para 10 mm; instalar 2 mesas densimétricas logo após o *trommel* da unidade de afinação para permitir uma separação mais eficaz de partículas mais pesadas das mais finas, quer através de movimentos vibratórios das mesas, quer através de jatos de ar; instalação de um mecanismo de elutriação por ar na unidade de afinação. Relativamente ao caso do vidro, não existe uma tecnologia (via seca) que seja eficaz o suficiente para retirar todos pequenos pedaços que possam existir no material. No entanto, a presença do vidro pode diminuir se forem tomadas a cabo algumas medidas, como a instalação de uma cabine de triagem antes do *trommel 1*, onde se iria proceder à recolha de garrafas e pedaços maiores de vidro. Existe também a possibilidade de se proceder a um processo de laminagem ao composto, onde os resíduos de vidro seriam reduzidos a minúsculas partículas.

No entanto, o problema dos inertes estará sempre na sua origem - a participação do público a práticas de reciclagem. Fomentar hábitos de reciclagem é a tarefa que deve receber mais atenção. Uma sugestão seria a criação de um circuito de recolha de diferenciados nos meios industriais e em estabelecimentos como restaurantes e cafés, localizados em grandes centros populacionais. Esta medida iria permitir não só aumentar a recolha de resíduos diferenciados, como também controlar a produção de resíduos nestes meios.

No sentido de fomentar a participação do público à práticas de reciclagem, a EcoBeirão candidatou-se ao programa POSEUR (Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos), criado em 2014 como sendo um dos 16 programas criados para a operacionalização da Estratégia Portugal 2020. O POSEUR pretende contribuir especialmente na prioridade de crescimento sustentável, permitindo à AMRPB adquirir o dobro do número de ecopontos disponíveis na região abrangida, bem como de viaturas de recolha.

Comparando com os compostos comerciais expostos no Anexo G, é possível constatar que embora o teor de sólidos voláteis no composto encontre-se dentro da gama de valores considerada ideal pelo D.L., verifica-se que é muito reduzido, o que significa que o processo de degradação de MO foi muito extenso.

O resultado obtido a partir do teste de Dewar aponta para que o composto em estudo se encontre maturado. No entanto, na sua aplicação, deve-se ter em conta a que tipo de culturas se destina devido à proveniência da matéria-prima ser da recolha indiferenciada de resíduos urbanos.

Neste trabalho era desejada a determinação do teor de azoto de Kjeldahl total (*TKN-Total Kjeldahl Nitrogen*) pelo que deviam ter sido utilizadas amostras tal e qual. Nestas condições, o valor do resultado final da análise laboratorial expressaria a conjugação da concentração em termos de azoto orgânico e azoto amoniacal. Tal não aconteceu porque durante o processo de amostragem no Planalto Beirão, a preservação das amostras foi feita com recurso a uma estufa previamente aquecida a temperatura de 103 ± 2 °C. Assim, uma fração do azoto amoniacal terá sido perdido por volatilização, pelo que o resultado expressa o teor de azoto orgânico e algum azoto amoniacal excedente que possa não ter sido removido.

Capítulo 5. Outras atividades realizadas durante o estágio

Para além das atividades previstas na planificação do estágio, foram efetuadas outras atividades que visavam não só desenvolver competências técnicas na área de Engenharia do Ambiente, como também auxiliar a empresa na manutenção da mesma. Estas atividades foram executadas diariamente, ao longo do estágio.

a) Recolha e análises ao digerido proveniente do digestor anaeróbio.

Procedi à recolha diária de uma amostra de digerido na tremonha, sendo efetuadas as seguintes análises:

- Temperatura: com o auxílio de um termómetro, foi medido este parâmetro a fim de avaliar e regular as condições operatórias no interior do digestor. Como já referido, o processo que ocorre no digestor em questão dá-se na faixa mesofílica (15 a 45°C). Nesta faixa, o processo de digestão tem um maior desempenho em temperaturas entre 30 até 40°C (temperatura óptima entre 35 e 37°C), pelo que a análise da temperatura visa manter o interior do digestor nessa gama de valores (Souza, 1984).
- pH: foi realizada a leitura deste parâmetro através de um medidor digital de pH. A importância deste procedimento advém do facto dos microorganismos metanogénicos serem considerados sensíveis ao pH. Por outras palavras, o crescimento ótimo da população microbiana ocorre numa faixa relativamente estreita (em torno de 6,5 a 7,5), embora possam conseguir a estabilidade para a formação de biogás numa faixa mais ampla (entre 6 e 8). Valores acima ou abaixo desta gama devem ser evitados, uma vez que estes inibem por completo os microorganismos produtores de biogás. Torna-se assim imperativo regular o pH no interior do digestor para promover uma maior rentabilização do processo de degradação de MO e produção de biogás (Reis, 2012). Segundo os parâmetros da Ferrovial Serviços, o pH deverá ser maior que 7.5.
- Bicarbonatos e AGV: a medição aos bicarbonatos e AGV (ácidos gordos voláteis) foi baseada numa titulação com H_2SO_4 0.1 N em dois pontos de pH (5.1 e 3.5). Este procedimento permitiu calcular as concentrações de AGV e bicarbonatos. A razão para a medição destes dois parâmetros deve-se ao facto da acumulação destes poder por em causa o metabolismo celular. A acumulação excessiva de AGV no digestor gera desequilíbrios metabólicos, induzindo a redução do pH interno, provocando um decréscimo da velocidade metabólica ou a morte celular. Este aspeto leva à diminuição do teor em metano no biogás produzido. Os bicarbonatos servem de sustento às bactérias metanogénicas, pelo que um decréscimo no seu teor leva à diminuição da população microbiana e ao desequilíbrio do processo de fermentação (Gonçalves,

2012). Segundo os parâmetros da Valorga, a sua concentração deve ser superior a 15 g.L⁻¹.

- Outros parâmetros medidos: a condutividade elétrica por via de um condutivímetro digital; massa volúmica com uma proveta de 2000 ml de volume.
- b) Triagem de resíduos: esta análise consistiu na separação das diferentes frações dos resíduos triados a fim de avaliar a sua percentagem. O método de triagem pode variar consoante a origem da amostra: se esta representa os tapetes CT 105 e 107, a triagem é feita sobre um peneiro com malha de 10 mm; se a amostra fosse proveniente de outros tapetes, usa-se peneiros de 50 e 20 mm. Para além do estudo das frações, também se efetua a análise da fração de inertes (vidro, pedras, conchas e metais) na amostra do CT 120.
- c) Teor de inertes: após a pesagem da amostra para triagem, recolhe-se uma porção da mesma para colocar na estufa. Posteriormente, com a estabilização do seu peso, a amostra é colocada na mufla, sendo ao fim de 24 horas peneirada com peneiros de 20, 2 e 0,5 mm. Os inertes foram pesados consoante a sua granulometria. No final da triagem da amostra, recolhe-se também uma porção da fração de resíduos “Finos”, que corresponde ao material que passa pelos orifícios do peneiro de 20 mm. Esta porção também passa pela estufa e pela mufla, sendo no fim peneirada com um peneiro de malha de 1mm. Considerou-se inertes os materiais que ficavam retidos na malha.
- d) Sucos prensados e filtrados: a análise aos sucos iniciou-se com a leitura do pH e condutividade elétrica. Retirou-se uma porção para colocar na estufa e mufla, para proceder ao estudo de inertes por via de peneiros com malha de 20, 2 e 0.5 mm.
- e) Bolos prensados e filtrados: procedeu-se à sua amostragem para poder analisar o teor em inertes, à semelhança dos sucos.

Capítulo 6. Discussão global

No início, o estágio tinha como objetivo acompanhar todo o processo de obtenção de composto na AMRPB, mas como já foi referido, só foi possível avaliar a mistura inicial e o composto anteriormente produzido. Este problema deveu-se a problemas de ordem técnica como o excesso de inertes no digestor. De facto, uma das principais causas foi o entupimento dos tubos que conduziam o digerido para tremonha por resíduos de vidro. Perante este cenário era essencial procurar um novo rumo para o estágio, sem se desvincular do tema anterior. Acordou-se que iria-me debruçar sobre a unidade de tratamento mecânico, promovendo o estudo de balanços mássicos à linha que conduz a matéria orgânica para a CVO, e um teste de rendimento global à unidade. Um dos objetivos era analisar os fluxos de resíduos para encontrar uma razão para encontrar uma quantidade tão avultada de inertes no interior do digestor. Trata-se de uma análise de grande importância para prevenir novos entupimentos nos tubos, promover uma maior eficiência no processo de degradação da matéria orgânica, e fomentar maior qualidade ao composto final. Devido à sua importância e ao facto de as análises efetuadas ao composto terem apontado uma quantidade exageradamente grande de inertes antropogénicos, sugiro que se continue a fazer análises deste género à UTM.

Relativamente à mistura inicial e ao composto analisados, é de realçar a importância da caracterização da MO segregada na UTM, pois permite inferir sobre a qualidade do composto. Assim sendo, sugere-se que se continue a promover análises semelhantes às que se fez para este relatório, a fim de averiguar a sua qualidade física e química. Com os resultados das análises, será possível propor medidas que possam promover uma maior qualidade do composto final.

Referências bibliográficas

a) Bibliografia

AMRPB (2015). PAPERSU 2020 – Plano de Acção. Disponível em: <http://www.planaltobeirao.pt/home/attachments/article/139/PAPERSU%201.pdf>

AMRPB (2013). Relatório de gestão e conta referência. Disponível em: http://www.planaltobeirao.pt/home/index.php?option=com_content&view=article&id=133:amrpb-relatorio-de-gestao-de-2013&catid=39:documentos-financeiros&Itemid=159.

AMRPB (2015). Relatório de gestão e conta referência. Disponível em: http://www.planaltobeirao.pt/home/index.php?option=com_content&view=article&id=146:amrpb-relatorio-de-gestao-de-2015&catid=39:documentos-financeiros&Itemid=159.

APA. (2014). PERSU 2020: Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos. Disponível em: http://apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioPropostaPERSU2020_Fev14_v2.pdf.

APA. (2015). Relatório do estado do ambiente. Disponível em: http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/rea/REA2016/REA_2015_White_Final.pdf.

Brás, I., Silva, M. E., Lobo, G., Cordeiro, A., Faria, M., Lemos, L. T. (2017). Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study.

Carvalho, I.G.R. (2011). CDR, um resíduo ou um produto, e sua viabilidade técnico-económica: análise do estudo de caso. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Costa, M. L. S. (2014). Estudo de processos de compostagem centralizada e doméstica aplicáveis à empresa AMBISOUA. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Cruz, M. L. F. R. (2005). A caracterização de resíduos sólidos no âmbito da sua gestão integrada. Dissertação de mestrado em Ciências do Ambiente. Escola de Ciências da Universidade do Minho.

Diaz, L. F., Savage, G. M., Eggerth, L. L. e Golueke, C. G. (1993). Composting and Recycling Municipal Solid Waste, Lewis Publishers, Boca Raton.

Epstein, E. (2011). Industrial Composting - Environmental Engineering and Facilities Management. Ed.: Taylor and Francis.

Gomes, A. P. D. (2001). Fundamentos da compostagem de resíduos sólidos. Dissertação de doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Gomes, C. M. F. (2015). Indicadores de Eficiência entre “Crivo Granulométrico Diferenciado vs Crivo de Discos Dinâmicos” para Separação de Materiais Recicláveis e Matéria Orgânica – Caso de Estudo na RESINORTE SA. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Gonçalves, C. D. G. (2012). Modelação do processo de digestão anaeróbia da FORSUL à escala industrial. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Graves et al (2010). Chapter 2 Composting. Part 637 Environmental Engineering National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Haug, R. T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Boca Raton. Lewis Publishers.

Kreyszig, E. (1970). Introductory Mathematical Statistics: principles and methods. John Wiley & Sons, Inc.

Levy & Cabeças (2006). Resíduos Sólidos Urbanos - Princípios e Processos. Lisboa: Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente (AEPSA).

Marques, A. S. M. L. C. (2008). Valorização Orgânica do Subproduto da Destilação do Bagaço de Uva. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Martins, D. S. (2013). Valorização de Resíduos Orgânicos da Indústria Agro-alimentar. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Mendes, J. S. S. (2011). Compostagem de espécies invasoras de *Acacia longifolia* e *Acacia melanoxylon*. Dissertação de mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território. Instituto Politécnico de Viana do Castelo. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima.

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and resource recovery, 5rd ed., McGraw-Hill International Edition.

Methods Book for the Analysis of Compost. (2003). Germany: Federal Compost Quality Assurance Organisation (FCQAO) & Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK).

Minghua, Z.; Xiumin F.; Rovetta A.; Qichang H.; Vicentini F.; Bingkai L.; Giusti A.; Yi L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong New Area, China. Waste Management, 29, 1227-1233.

Oliveira, D. P. (2015). Valorização de resíduos provenientes da atividade no setor avícola: aplicação do processo de compostagem. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Paradela, C. S. (2014). Projeto Piloto de Compostagem Acelerada. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Penacho, I. F. M. (2016). Estudo da Compostagem na ERSUC - otimização de variáveis no CITVRSU de Coimbra. Dissertação de mestrado em Gestão Ambiental. Escola Superior Agrária de Coimbra.

Pereira Neto, J. T. (1987). "On the Treatment of Municipal Refuse and Sewage Sludge Using Aerated Static. Citado por Russo (2003)

Piedade, M.; Aguiar, P. (2010). Opções de Gestão de resíduos Urbanos. Série Guias Técnicos. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. ISBN: 978989-8360-01-1.

Reis, A. S. (2012). Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco.

Ribeiro, R. S. G. (2014). Análise Tecno-económica da recolha e triagem de resíduos urbanos. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Rodrigues. M. M. L. (2009). Estações de triagem: Caracterização e avaliação da situação nacional. Dissertação de mestrado em Engenharia Sanitária. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa.

Rojas, M. G. R. (2014). Otimização da Operação e Manutenção de um Sistema de Separação de Resíduos - Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da AMRPB. Dissertação de mestrado em Tecnologias Ambientais. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Russo, M. A. T. (2003). Tratamento de Resíduos Sólidos., *em Tratamento de Resíduos Sólidos*, apontamentos teóricos da disciplina. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Rynk, R., Kamp, M., Willson, G., Singley, M., Richard, T., Kolega, J., Gouin, F., Laliberty, L., Kay, D., Murphy, D., Hoitink, H., Brinton, W. (1992). On-Farm Composting Handbook, Ed.: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.

Sá, E. V. M. (2009). Validação de um modelo de compostagem usando um compostor doméstico. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Shrivastava, P., Kumar, R. (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. Saudi Journal of Biological Sciences, 22, 123-131.

Souza. M. E. (1984). Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. Disponível em: http://biogas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2014/11/revista_dae_vol44_n137_1984.pdf;

Teixeira, N. A. R. (2009). Recuperação de Resíduos de Embalagem através do Tratamento Mecânico e Biológico em Portugal Continental. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa.

Tchobanoglous, G. & Kreith, F. (2002). Handbook of Solid Waste Management (2nd ed.). McGraw-Hill, United States of America, 834 pp.

Ventura, M. A. L. F. (2009). Modelização de um processo aeróbio de tratamento biológico de resíduos. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Zucconi, F., Pera, A., Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost, BioCycle, vol.22 (2) pp. 54-57.

b) Documentos Legais

Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de agosto. Diário da República nº 153/2009 – I Série .
Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa;

Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho. Diário da República nº 116/2011 – I Série.
Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa;

Directiva 1999/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. (26 de abril de 1999). Jornal
Oficial da União Europeia. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=EN>;

c) Normas analíticas e referências protocolares

DG ENV. A.2. (2001). *Biological treatment of biowaste, 2nd Draft of biological treatment – Working Document. (February 2001). European Commission, Brussels. 26p.* Disponível em:

<http://mie.esab.upc.es/ms/informacio/legislacio/Unio%20Europea/working%20document%20biowaste%202.pdf>;

DG ENV. A.2/LM (2003). *Biowastes and Sludges – Draft Discussion Document. (December 2003) European Commission, Brussels. 22p.*

European Standard EN 13037:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of pH.*

European Standard EN 13038:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of electrical conductivity*

European Standard EN 13039:2011 - *Soil improvers and growing media. Determination of organic matter content and ash.*

European Standard 13040:2007 - *Soil improvers and growing media. Sample preparation for chemical and physical tests, determination of dry matter content, moisture content and laboratory compacted bulk density.*

European Standard EN 13650:2001 - *Soil improvers and growing media. Extraction of aqua regia soluble elements.*

European Standard EN 13654-1:2001 - *Soil improvers and growing media – Determination of nitrogen- Part 1: Modified Kjeldahl method.*

Anexo A : Esquema da linha de tratamento mecânico de RU do Planalto Beirão

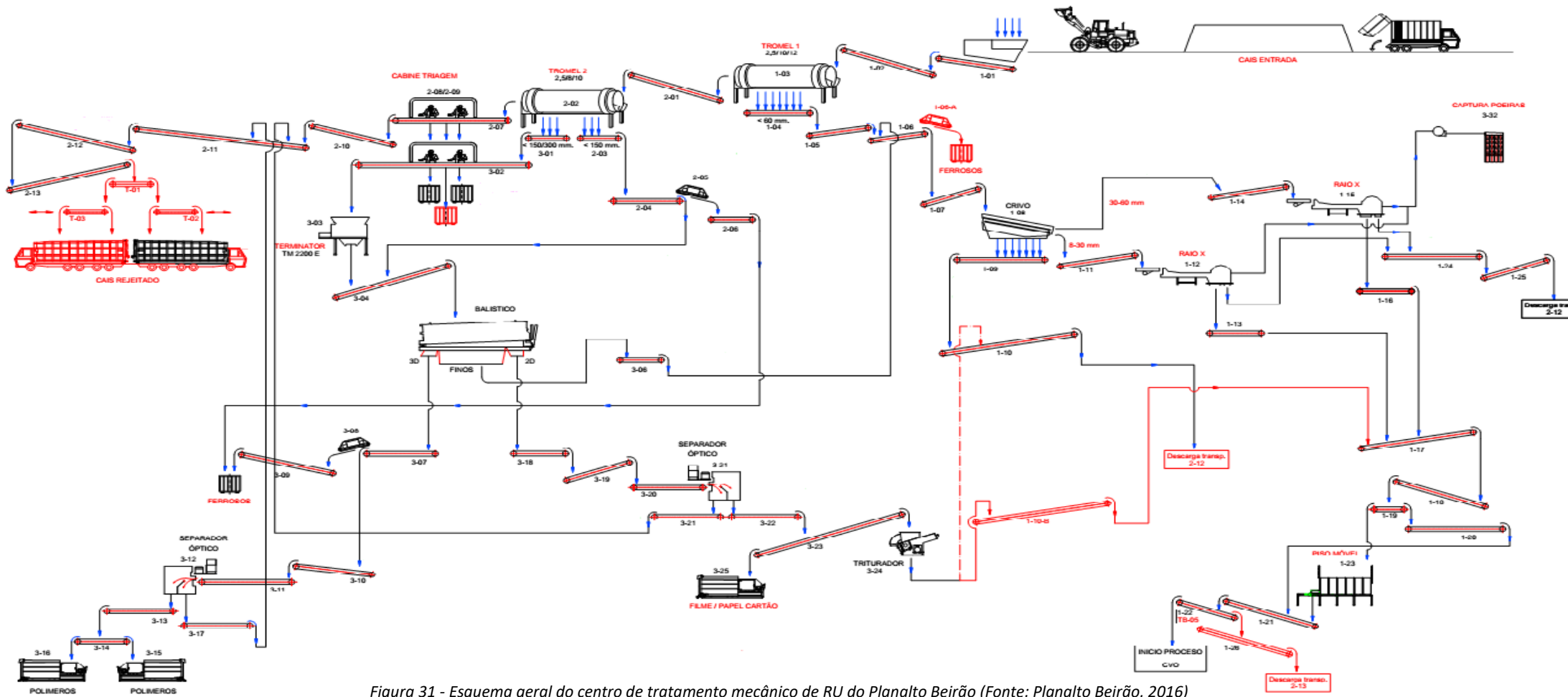


Figura 31 - Esquema geral do centro de tratamento mecânico de RU do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016)

Anexo B: Esquema da unidade de compostagem do Planalto Beirão

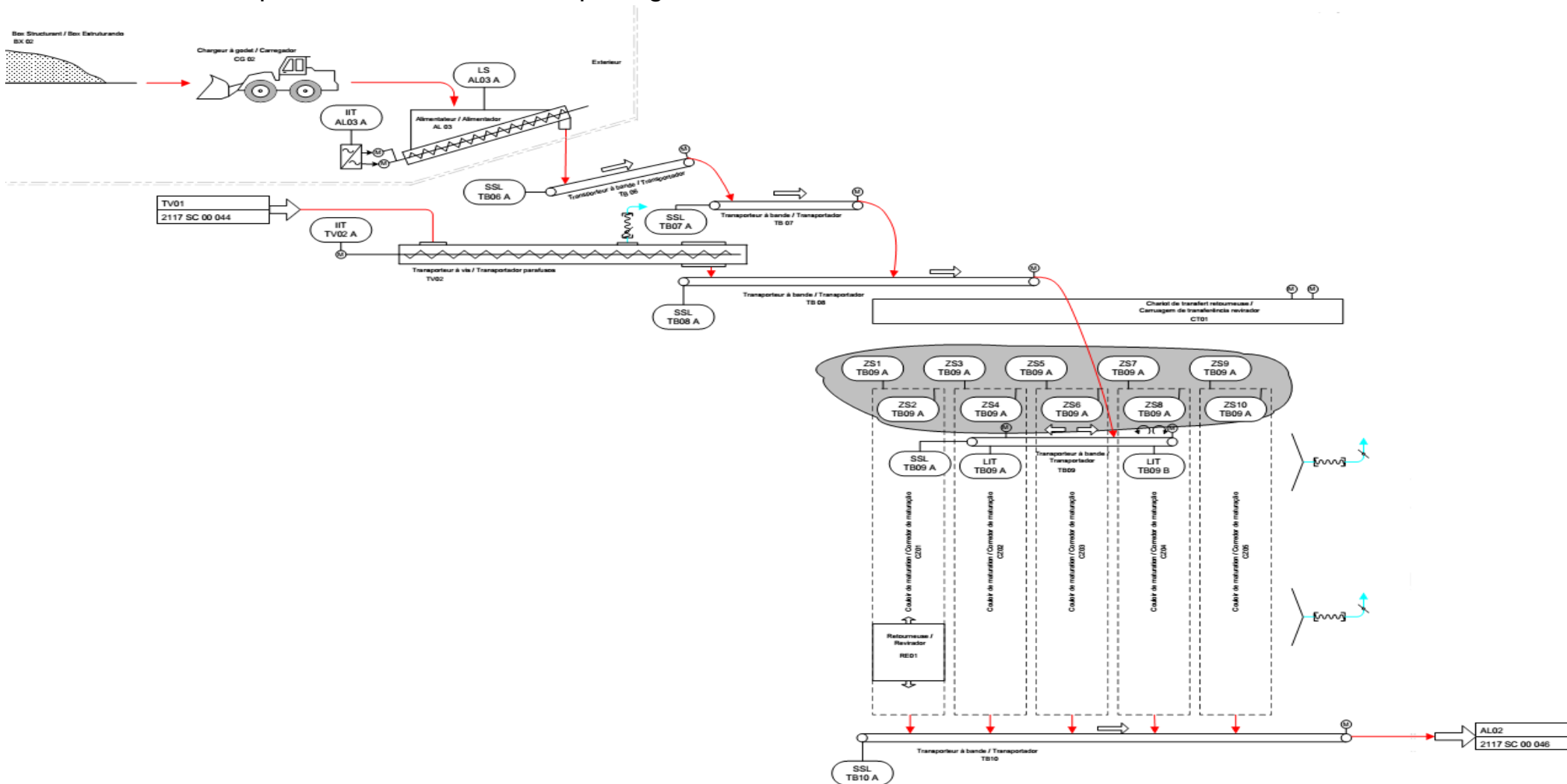


Figura 32 - Esquema geral da unidade de compostagem do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016)

Anexo C: Esquema da unidade de afinação do composto do Planalto Beirão

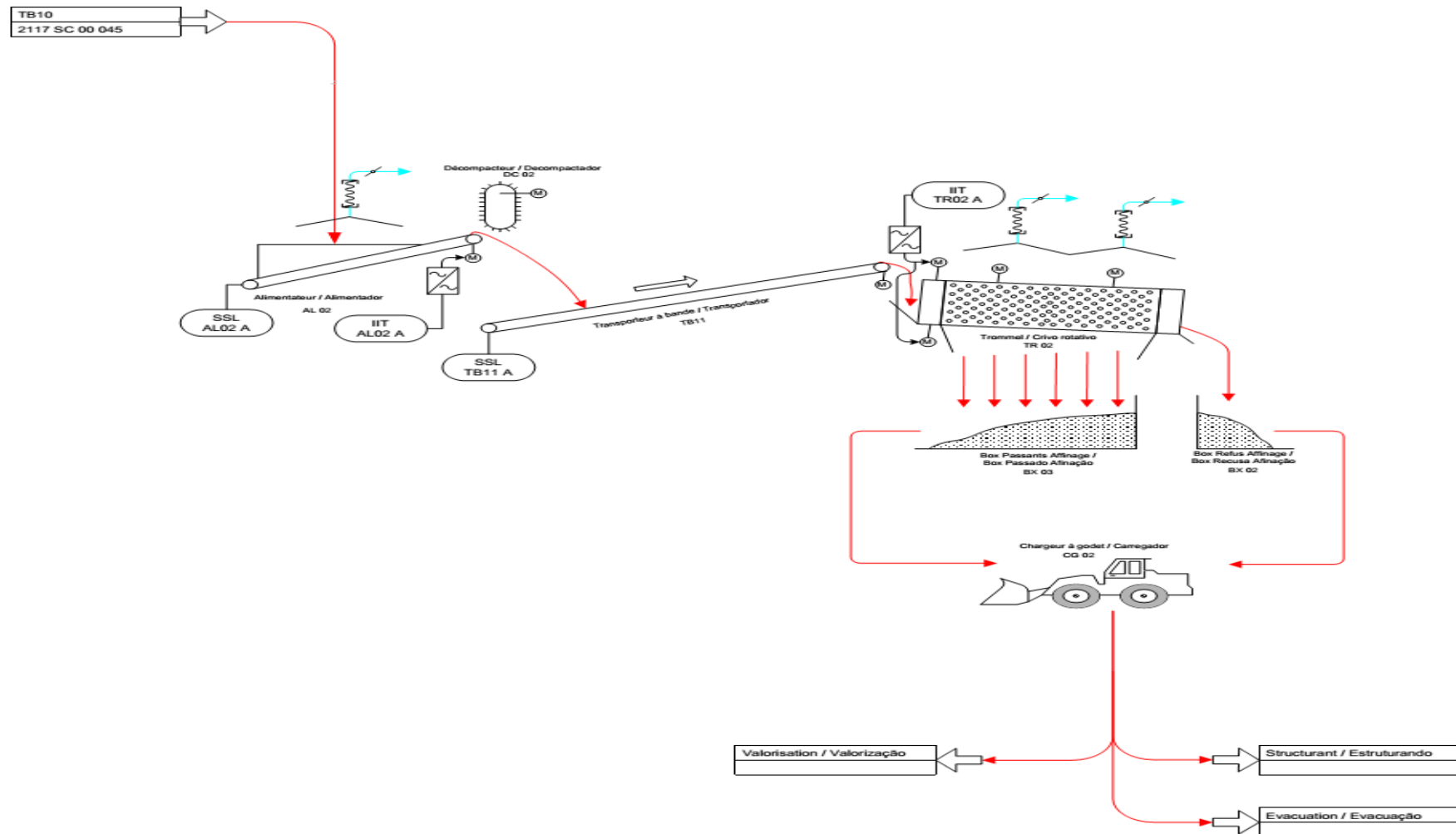


Figura 33 - Esquema geral da unidade de afinação do composto do Planalto Beirão (Fonte: Planalto Beirão, 2016)

Anexo D: População e produção de resíduos

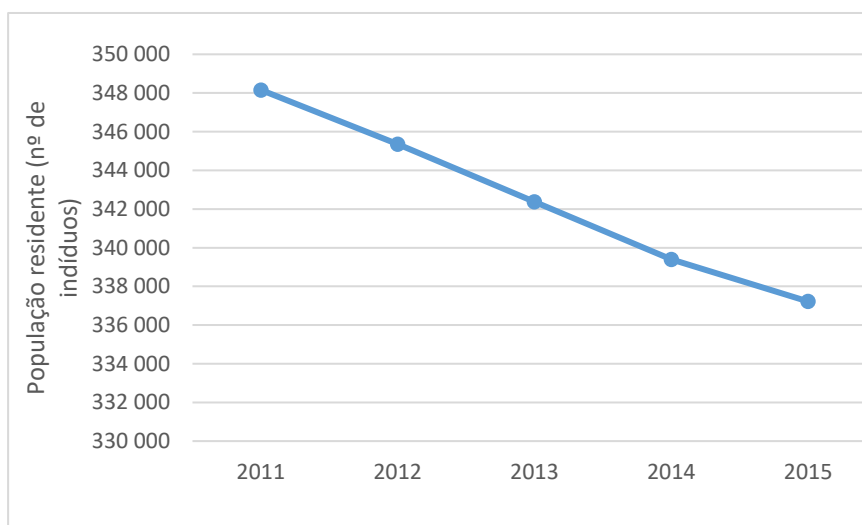


Figura 34 - População residente na região do Planalto Beirão (PORDATA, 2017)

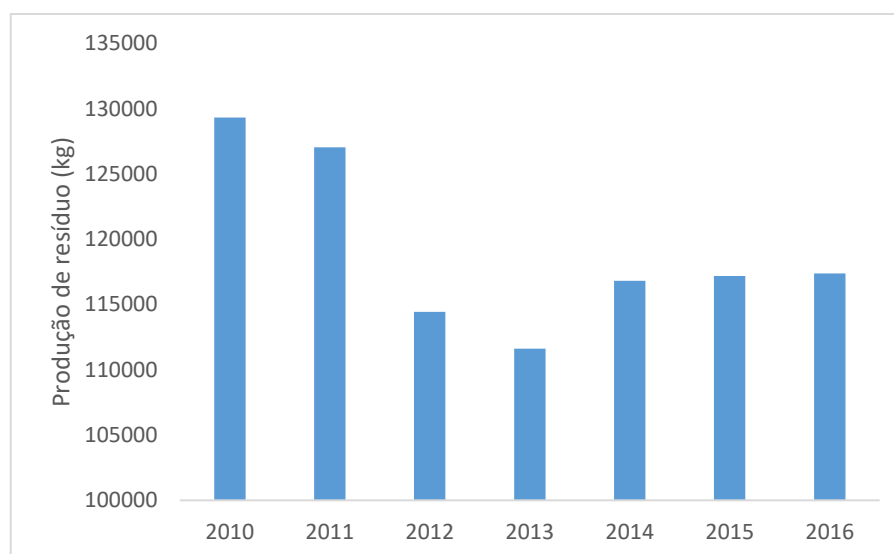


Figura 35 – Produção de resíduos na região abrangida pela AMRPB (EcoBeirão, 2017)

Anexo E: Balanço Mássico da linha dos RUB (2011)

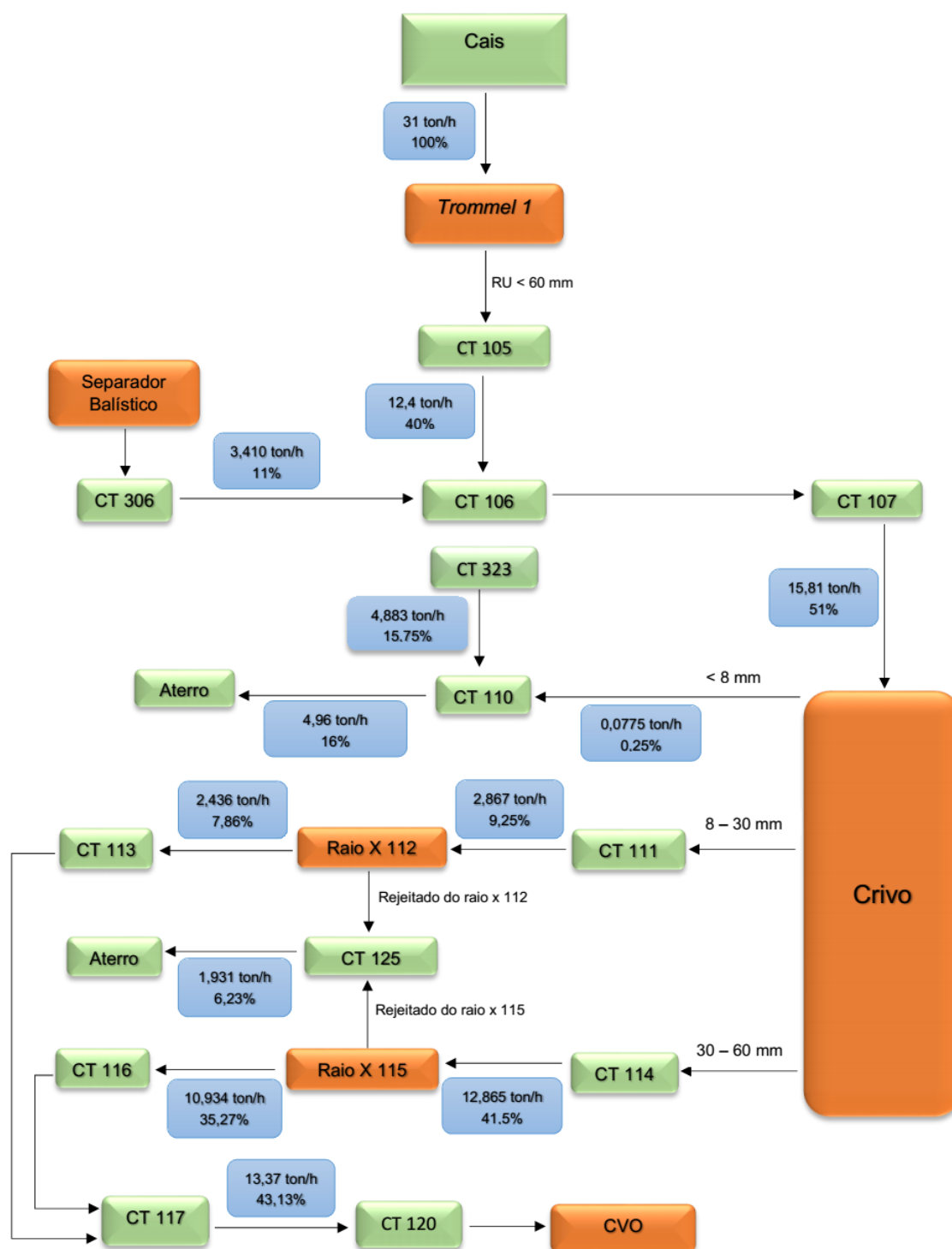


Figura 36 – Esquema do balanço mássico efetuado aquando do dimensionamento do TM em 2011

Anexo F: Outras tecnologias de compostagem

- Sistemas Não-Reator

Neste tipo de sistema, a sua configuração permite que o material entre em contacto com o ar circundante pelo que as instalações podem ser fechadas ou abertas, podendo estas últimas ter cobertura ou não. O sistema de arejamento pode ser do tipo passivo ou activo, implicando neste último o revolvimento da massa em compostagem e/ou um arejamento forçado por insuflação e/ou aspiração (Piedade & Aguiar, 2010). Inclui as seguintes tecnologias:

a) Pilhas Revolidas (*windrow process*)

Trata-se de um dos métodos mais antigos de compostagem onde as dimensões ideais das pilhas são tema de debate entre vários autores: Tchobanoglous & Kreith (2002), defendem que na sua forma mais simples, este tipo de sistema pode ser construído através da disposição da matéria-prima em pilhas com cerca de 2,4 a 3 m de altura e 6 a 7,6 m de largura, podendo o seu comprimento estender-se por centenas de metros; já Metcalf & Eddy (2014) propõem uma altura de 1,0 a 2,0 m e uma largura de 2,0 a 4,3 m.

No decurso do processo de compostagem, as pilhas são periodicamente revolvidas através de equipamentos especializados para que o seu revolvimento permita desfazer aglomerados, homogeneizar o material e garantir a manutenção duma adequada porosidade. Este será o aspeto mais importante do revolvimento, embora outra vantagem seja a reoxigenação do interior, ainda que de curta duração, pois os microorganismos consomem rapidamente o oxigénio, num tempo estimado de trinta minutos (Rynk et al, 1992). Para além da ação do revolvimento, o oxigénio também pode ser fornecido aos microrganismos por convecção natural (Haug, 1993). A introdução de oxigénio no interior da pilha possibilita a equalização do teor de humidade e o controlo da temperatura interior (Rynk et al, 1992). Por norma, no início do processo o revolvimento é feito diariamente devido à intensa atividade microbiana que origina temperaturas mais elevadas. À medida que o processo progride, o revolvimento será feito duas vezes por semana, mantendo a temperatura do interior das pilhas à volta de 55 °C. O processo de compostagem pode durar cerca de três a quatro semanas. Depois do período de revolvimento, as pilhas serão maturadas num período de três a quatro semanas, sem que ocorra revolvimento (Tchobanoglous & Kreith, 2002). A Fig. 37 ilustra este método de compostagem.

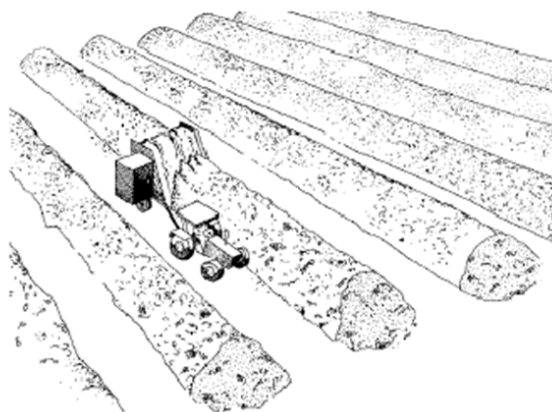


Figura 37 - Pilhas revolvidas (Adaptado de Rynk et al, 1992)

b) Pilhas estáticas com arejamento

A configuração deste método é muito semelhante ao das pilhas revolvidas diferenciando-se pelo modo como o oxigénio é fornecido aos microrganismos: no método das pilhas revolvidas o oxigénio é fornecido por convecção natural ou por revolvimento; no método das pilhas estáticas com arejamento são usados sistemas mecânicos de ventilação que insuflam ar por uma grelha multiperfurada na base da pilha, atravessando-a e libertando-se à sua superfície (arejamento forçado). O objetivo deste procedimento é controlar as duas variáveis mais importantes do processo: a concentração de oxigénio que não deve ser inferior a cerca de 17% dos gases de saída; e a temperatura que deve situar-se na gama de 50-60°C, dependendo do substrato (Rynk et al, 1992). A altura inicial das pilhas depende da porosidade do material, das condições meteorológicas e do alcance do equipamento utilizado para construir a pilha e situa-se entre 1,5 a 2,4 m. Porém, pode ser necessária uma camada extra, constituída de composto estabilizado ou de bulking agents, que será vantajosa no inverno para reter o calor e filtrar amónia e potenciais odores gerados no interior da pilha. O comprimento da pilha é limitado pela distribuição de ar no tubo de aeração. O processo decorre ao longo de 21 a 28 semanas e de acordo com perfil específico de temperatura e após o processo de compostagem, segue-se um período de maturação em pilhas revolvidas de 30 dias (Metcalf & Eddy, 2014; Rynk et al, 1992). De forma a minimizar a área necessária para o processo de compostagem, existe um método que consiste em agregar as pilhas, denominado de pilhas alargadas, no qual a matéria-prima vai sendo acrescentada paralelamente à pilha já formada. As pilhas alargadas ocupam cerca de menos de 50% da área relativamente às individuais (Costa, 2014). A Fig. 38 ilustra este método de compostagem.

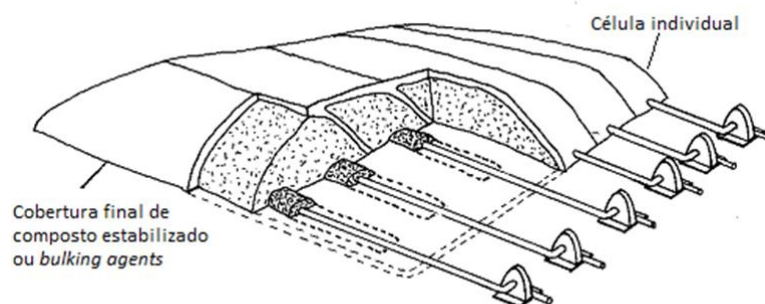


Figura 38 - Exemplo de pilhas agregadas (Adaptado de Rynk et al, 1992)

- Sistemas Reator (*In-Vessel systems*)

Ao contrário dos sistemas não-reator, os sistemas reator referem-se a um grupo de métodos de compostagem nos quais o processo decorre em compartimentos fechados recorrendo ao arejamento forçado e ao revolvimento mecânico para acelerar o processo de compostagem (Rynk et al, 1992). Incluem os seguintes equipamentos:

a) Caixas de Compostagem (*Bin Composting*)

Será talvez o método mais simples sistemas reator onde os materiais são contidos por paredes e geralmente por uma cobertura, usualmente construídas com ripas de madeira ou em cimento, permitindo o empilhamento de uma maior quantidade de material e uma melhor ocupação do espaço (Rynk et al, 1992). Através deste método é possível conter odores, providenciar melhor controlo da temperatura do material a compostar e contornar problemas que advenham de condições meteorológicas. Basicamente, o método de compostagem é semelhante ao das pilhas estáticas com arejamento, pois inclui meios de arejamento forçado através da base da caixa de compostagem, e pouco ou nenhum revolvimento dos materiais. No entanto, é aconselhável um revolvimento ocasional para manter uma compostagem aeróbia (Graves et al, 2010).

b) Silos

Neste método a compostagem é feita em silos com mais de 4 m de altura onde diariamente a matéria-prima misturada é introduzida a partir do seu topo e o material já decomposto é removido através da base do silo, sendo encaminhado para outro silo onde ocorrerá a sua maturação (Costa, 2014). O sistema de arejamento compreende: a introdução de ar a partir da base do silo, sendo este forçado a atravessar o material em compostagem; e a exaustão em que o ar é recolhido na parte superior do silo para tratamento de odores (Rynk et al, 1992). Dado que o tempo de compostagem é normalmente de catorze dias, isto implica que 1/14 do volume do silo seja removido e substituído diariamente (Graves et al, 2010)

sendo o tempo de retenção estimado para a maturação do composto em 20 dias (Costa, 2014). Este método minimiza a área necessária para o processo de compostagem pois os materiais a compostar serão empilhados verticalmente dentro do silo. A Fig. 39 ilustra este método de compostagem.

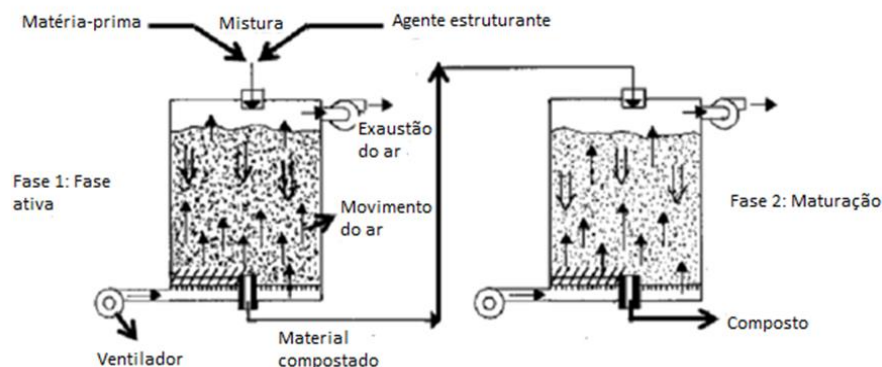


Figura 39 - Representação esquemática de um sistema de silos (Adaptado de Rynk et al, 1992)

c) Tambor Rotativo

O tambor rotativo é uma alternativa a considerar quando o material a compostar é gerado em intervalos regulares de curto prazo sendo este sistema composto por um cilindro rotativo horizontal que garante a mistura, o arejamento e o transporte do material ao longo do processo. Por norma, os cilindros têm um diâmetro de 2,7 metros e uma velocidade de rotação de 2 rpm. O tempo de retenção é estimado entre 1 a 6 dias, sendo determinado pela velocidade de rotação e pela inclinação do cilindro (Tchobanoglous et al, 1993). Segundo Rynk et al (1992), um cilindro com 3,4 m de diâmetro e 36,6 m de comprimento tem capacidade para receber resíduos em 50 ton /dia, com um tempo de residência de três dias. O ar fornecido aos resíduos entra no tambor pela abertura final ou por outras aberturas que o mesmo possa ter, circulando na direção oposta. O material recém-carregado recebe ar mais quente para ajudar a estimular o crescimento bacteriano (Rynk et al, 1992). O deslocamento do material no interior do tambor é feito por ação gravítica, sendo o tambor ligeiramente inclinado na extremidade de saída do composto permitindo que o material se desloque por gravidade para a direção oposta através de uma rotação lenta (Paradela, 2014). A rotação permite maior homogeneização e trituração dos resíduos, diminuindo a formação de acentuados gradientes de temperatura (Ventura, 2009). A Fig. 40 ilustra este método de compostagem.

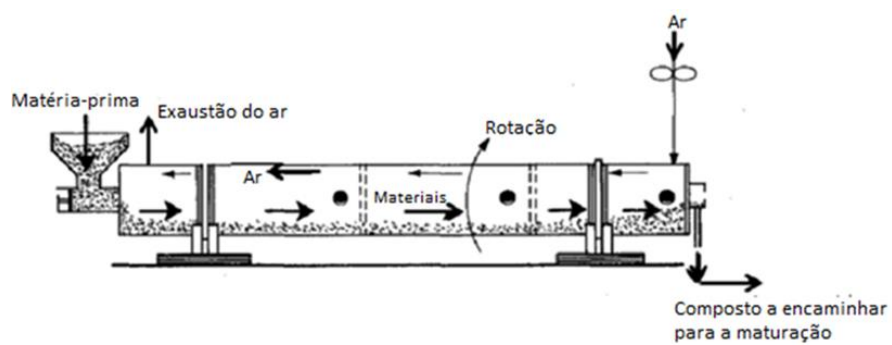


Figura 40 - Representação esquemática de um tambor rotativo (Adaptado de Rynk et al, 1992)

Anexo G: Compostos comerciais

Tabela 23 - Características físicas e químicas do composto comercial - Siro Agro 2

| Corretivo Orgânico Comercial | |
|------------------------------|-------------|
| Parâmetros | Teor |
| Humidade | 34% |
| MO | 70% |
| Azoto total | 2,98% |
| Carbono Orgânico | 41,45% |
| Inertes antropogénicos | 0% |
| C/N | 12 |
| pH | 7,8 |
| Cádmio | 0,49 mg/kg |
| Chumbo | 10,32 mg/kg |
| Cobre | 20,43 mg/kg |
| Crómio | 10,61 mg/kg |
| Níquel | 7,09 mg/kg |
| Zinco | 65,3 mg/kg |

| | |
|--|--------|
| Humidade - EN 12880 | 32,8 % |
| pH (H ₂ O) - EN 12176 | 6,5 |
| Condutividade Eléctrica (mS/cm, 25°C) | 1,3 |
| Matéria Orgânica - EN 12879 | 63,2 % |
| Azoto total, expresso em N - EN 13342 | 1,5 % |
| Fósforo total, expresso em P ₂ O ₅ | 0,8 % |
| Potássio total, expresso em K ₂ O | 0,7 % |
| Cálcio total, expresso em CaO | 4,3 % |
| Magnésio total, expresso em MgO | 0,5 % |

| | |
|--|-----------------|
| Análisis: | |
| pH en CaCl ₂ | 5.5 - 6.5 |
| pH em CaCl ₂ | |
| Humedad | 50 - 60 % |
| Humidade | |
| Conductividad | 0.8 - 1.2 CE |
| Condutividade | |
| Nitrógeno (N) | 80 - 150 mg/l |
| Azoto (N) | |
| Fósforo (P ₂ O ₅) | 80 - 150 mg/l |
| Fósforo (P ₂ O ₅) | |
| Potasio (K ₂ O) | 300 - 500 mg/l |
| Potássio (K ₂ O) | |
| Materia Orgánica (M.O.) | > 70% |
| Matéria Orgânica (M.O.) | |
| Vol. de llenado en producción | 10L al envasado |
| Vol. enchimento na produção | |

Figura 41 - Características físicas e químicas de outros compostos comerciais

Anexo H: Curvas de calibração para a determinação da concentração dos elementos nos materiais utilizados e compostos obtidos

Nesta secção são apresentadas as curvas de calibração das análises dos diferentes elementos, efetuadas à mistura inicial e ao composto. Como não havia conhecimento prévio do teor dos elementos esperado, foram utilizadas gamas de padrões abrangentes, procedendo-se a diluições da amostra quando necessário, de forma a fazer coincidir a mesma com a gama de padrões.

Tabela 24 - Curva de calibração referente às análises ao sódio (Na)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0058 \cdot X^2 + 0,1428 \cdot X + 0,1443$ $R^2 = 0,997$ |
| 1 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 6 | |
| 8 | |
| 10 | |

Tabela 25 - Curva de calibração referente às análises ao potássio (K)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0052 \cdot X^2 + 0,1464 \cdot X + 0,0555$ $R^2 = 0,998$ |
| 1 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 6 | |
| 8 | |
| 10 | |

Tabela 26- Curva de calibração referente às análises ao manganês (Mn)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0116 \cdot X^2 + 0,2361 \cdot X - 0,0014$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,2 | |
| 0,6 | |
| 0,8 | |
| 1,2 | |
| 1,6 | |
| 2 | |

Tabela 27 – Curva de calibração referente às análises ao ferro (Fe)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0009 \cdot X^2 + 0,0497 \cdot X - 0,0099$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,6 | |
| 1,8 | |
| 2,4 | |
| 3,6 | |
| 4,8 | |
| 6 | |

Tabela 28 - Curva de calibração referente às análises ao zinco (Zn)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0301 \cdot X^2 + 0,4438 \cdot X + 0,0068$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,1 | |
| 0,3 | |
| 0,4 | |
| 0,6 | |
| 0,8 | |
| 1 | |

Tabela 29 - Curva de calibração referente às análises ao níquel (Ni)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0017 \cdot X^2 + 0,0454 \cdot X - 0,0006$ $R^2 = 0,996$ |
| 0,2 | |
| 0,6 | |
| 0,8 | |
| 1,2 | |
| 1,6 | |
| 2 | |

Tabela 30 - Curva de calibração referente às análises ao chumbo (Pb)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0003 \cdot X^2 + 0,0276 \cdot X - 0,0022$ $R^2 = 0,999$ |
| 1 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 6 | |
| 8 | |
| 10 | |

Tabela 31 – Curva de calibração referente às análises ao cádmio (Cd)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0045 \cdot X^2 + 0,1199 \cdot X + 0,0052$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,2 | |
| 0,6 | |
| 0,8 | |
| 1,2 | |
| 1,6 | |
| 2 | |

Tabela 32 - Curva de calibração referente às análises ao crómio (Cr)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|--|
| 0 | $y = -6E-05 \cdot X^2 + 0,0266 \cdot X + 0,0004$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,5 | |
| 1,5 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |

Tabela 33 - Curva de calibração referente às análises ao cobre (Cu)

| Concentração do padrão (mg/L) | Curva de calibração |
|-------------------------------|---|
| 0 | $y = -0,0002 \cdot X^2 + 0,0755 \cdot X + 0,0026$ $R^2 = 0,999$ |
| 0,5 | |
| 1,5 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |

Anexo I – Intervalos de confiança para a média de uma amostra com distribuição normal

Para a determinação do intervalo de confiança de 95% foi necessário calcular inicialmente o valor de k através da seguinte equação:

$$k = c\sigma / \sqrt{n}$$

O valor de “ c ” é retirado da Tabela 34.

Tabela 34 - Valor de c correspondente ao intervalo de confiança pretendido (Kreyszig, 1970)

| Intervalo de confiança | 0,9 | 0,95 | 0,99 | 0,999 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| c | 1,645 | 1,960 | 2,576 | 3,291 |

O intervalo de confiança inferior e superior é calculado, respetivamente, subtraindo ou somando o valor de k ao valor da média.